

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra energetiky**

**Návrh výměníku havarijního dochlazování  
jaderné elektrárny MIR 1200**

Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling  
NPP MIR 1200

**Student:** Bc. Jaroslav Víteček  
**Vedoucí diplomové práce:** Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

**Ostrava 2013**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jaroslav Víteček**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh výměníku havarijního dochlazování jaderné elektrárny MIR 1200**  
**Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling NPP MIR 1200**

Zásady pro vypracování:

Navrhněte tepelný výměník havarijního dochlazování aktivní zóny a k plánovanému dochlazování při odstávkách reaktoru. Na základě rešerže literatury popište koncepci a funkci havarijního dochlazování reaktoru MIR 1200. Proveďte tepelný, hydraulický a pevnostní výpočet. Navrhněte optimální konstrukční tvar tlakové nádoby na základě modelování.

Zadané parametry: elektrický výkon hrubý 1198 MWe; elektrický výkon čistý 1113 MWe; tepelný výkon 3200 MWt; teplota na vstupu/výstupu aktivní zóny 298/329 °C; průtok chladiva reaktorem 86 000 m<sup>3</sup>/hod; tlak na výstupu z reaktoru 16,2 MPa; tlak páry na výstupu z PG 7,0 MPa; parní výkon PG 3200 t/hod; teplota napájecí vody 225 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03190-X.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně, 2001. ISBN 80-214-2028-6.

HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně, spomoci vedoucího diplomové práce a literatury, která je uvedena v závěru práce. Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc. za pomoc, bez níž by se práce vyvíjela o poznání složitěji.

V Ostravě .....

.....

Podpis studenta

### **Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě :.....

.....  
Podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:  
Okružní 24, Bruntál

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VÍTEČEK, J. *Návrh výměníku havarijního dochlazován jaderné elektrárny MIR 1200*. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB- Technická univerzita Ostrava, 2013, 83 stran, Diplomová práce, vedoucí: Kolat, P.

Diplomová práce se zabývá problematikou havarijních a dochlazovacích výměníků v aktivní zóně jaderné elektrárny MIR 1200. První část je zaměřená na základní členění primárního okruhu jaderné elektrárny, včetně schémat a popisu části aktivní zóny. Popis havarijního systému, včetně popisu a obrázku. Dále popis konkrétního havarijního výměníku, zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru, havarijní odstavení reaktoru, plánované odstavení reaktoru, popis a funkce trubkových výměníků, včetně obrázku.

Druhá část obsahuje teoretický rozbor a základní tepelný výpočet zvoleného havarijního výměníku tepla. *Pomocí základních rovnic termomechaniky se vypočítá výměník, pro předem zvolené vstupní a výstupní teploty ohřívaného a ochlazovaného média*. Grafická část bude obsahovat náčrt výměníku od firmy Královopolské strojírný – Brno.

## **ANOTATIONS OF MASTER'S THESIS**

VÍTEČEK, J. *Proposal of Heat Exchanger for Emergency Cooling NPP MIR 1200*. Ostrava: Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical university of Ostrava, 2013, 83 pages, Master thesis, supervisor: Kolat, P.

The master's thesis deals with problem of emergency and cooling exchanger in active zone of nuclear power plant MIR 1200. The first part is focused on the basic segmentation of primary circuit of nuclear powerstation including schemes and description of a part of the active zone. Description of emergency system including its description and image. There is also description of concrete emergency exchanger, the decay heat after the removal of reactor shutdown, emergency removal of the reactor, planned shutdown of the reactor, description and function of straight-tube exchangers including image.

The second part contains theoretical analysis and basic heat transfer calculation of selected emergency heat exchanger. *There is calculated exchanger by basic equations of thermodynamics for pre-selected inlet and outlet temperature of heated and cooled medium*. The graphic part contains an outline of exchanger from the company Královopolské strojírný - Brno.

## OBSAH:

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.    | Úvod.....  | 1  |
| 2.    | Základní členění primárního okruhu JE.....   | 2  |
| 2.1   | Reaktor .....  | 2  |
| 2.2   | Paragenerátor.....   | 3  |
| 2.3   | Kompenzátor objemu .....   | 3  |
| 2.4   | Hlavní cirkulační čerpadla .....   | 4  |
| 2.5   | Systém doplňování primárního okruhu .....  | 5  |
| 3.    | Havarijní systémy MIR1200.....   | 5  |
| 3.1   | Účel systému .....   | 5  |
| 3.2   | Sprchový systém .....  | 6  |
| 3.3   | Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování zóny primárního okruhu ..... | 6  |
| 3.4   | Systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování.....                       | 6  |
| 3.5   | Složení a technický popis systému.....   | 7  |
| 3.6   | Technický popis zařízení.....  | 8  |
| 3.6.1 | Sprchový systém.....   | 8  |
| 3.6.2 | Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování primárního okruhu 10         |    |
| 3.6.3 | Systém havarijního vysokotlakého doplňování.....                                     | 13 |
| 3.6.4 | Systém havarijního vysokotlakého vstřikování.....                                    | 14 |
| 3.6.5 | Systém ohřevu jímky .....  | 15 |
| 3.7   | Funkční popis systému.....   | 16 |
| 3.7.1 | Sprchový systém.....   | 16 |
| 3.7.2 | Nízkotlaký systém havarijního dochlazování.....                                      | 17 |
| 3.7.3 | Systém havarijního vysokotlakého doplňování.....                                     | 17 |
| 3.7.4 | Systém havarijního vysokotlakého vstřikování.....                                    | 18 |
| 3.7.5 | Systém ohřevu nádrže - jímky havarijní zásoby kyseliny borité.....                   | 18 |
| 4.    | Další bezpečnostní systémy MIR1200 .....   | 37 |
| 4.1   | Základní bezpečnostní systémy MIR-1200.....  | 37 |
| 4.2   | Pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu .....                                      | 39 |
| 4.3   | Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru .....                                   | 41 |
| 4.4   | Lapač roztavené aktivní zóny.....  | 41 |
| 4.5   | Systém kontroly vodíku v kontejmentu .....   | 41 |
| 4.6   | Těžké havarie .....  | 42 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 5.  | Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru .....                 | 42 |
| 6.  | Plánované odstavení bloku a vychlazování primárního okruhu ..... | 44 |
| 7.  | Návrh výměníku .....   | 45 |
| 7.1 | Pevnostní kontrola.....  | 45 |
| 7.2 | Tepelný výpočet .....  | 55 |
| 7.3 | Hydraulický výpočet .....  | 64 |
| 7.4 | Technologický postup při svařování kroužků víka dna (MIP).....   | 72 |
| 7.5 | Pevnostní výpočet v Programu ANSYS .....                         | 74 |
| 8.  | Závěr .....  | 78 |
| 9.  | Seznam použité literatury .....                                  | 79 |
| 10. | Přílohy.....   | 81 |
| 11. | Seznam výkresové dokumentace .....                               | 83 |

## Seznam použitých symbolů a zkratek

| Značka          | Jednotka                          | Popis   |
|-----------------|-----------------------------------|---|
| $\dot{a}_t$     | $[m^2 \cdot s^{-1}]$              | Součinitel teplotní vodivosti ohřívaného média  |
| $\dot{a}_s$     | $[m^2 \cdot s^{-1}]$              | Součinitel teplotní vodivosti ochlazované média |
| $c_p$           | $[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ | Tepelná kapacita                                |
| D               | $[m]$                             | Vnitřní průměr                                  |
| $d_1$           | $[m]$                             | Vnitřní průměr trubky                           |
| $d_2$           | $[m]$                             | Vnější průměr trubky                            |
| $d_{ekv}$       | $[m]$                             | Ekvivalentní hydraulický průměr                 |
| $d_s$           | $[m]$                             | Průměr přepážky                                 |
| k               | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$   | Součinitel prostupu tepla                       |
| $k_k$           | $[1]$                             | Součinitel bezpečnosti                          |
| l               | $[m]$                             | Délka   |
| $\dot{M}_t$     | $[kg \cdot s^{-1}]$               | Hmotnostní tok vody ohřívaného média            |
| $\dot{M}_s$     | $[kg \cdot s^{-1}]$               | Hmotnostní tok vody ochlazovaného média         |
| $\dot{m}_t$     | $[kg \cdot s^{-1}]$               | Hmotnostní průtok ohřívaného média              |
| $\dot{m}_s$     | $[kg \cdot s^{-1}]$               | Hmotnostní průtok ochlazovaného média           |
| Nu              | $[1]$                             | Nusseltovo kritérium                            |
| $Nu_t$          | $[1]$                             | Nusseltovo kritérium ohřívaného média           |
| $Nu_s$          | $[1]$                             | Nusseltovo kritérium ochlazovaného média        |
| o               | $[m]$                             | Omočený obvod                                   |
| P               | $[Pa]$                            | Výpočtový přetlak                               |
| $P_1$           | $[1]$                             | Parametr 1                                      |
| $P_H$           | $[Pa]$                            | Tlak pro hydraulickou zkoušku                   |
| $Pr_t$          | $[1]$                             | Prandtlovo kritérium ohřívaného média           |
| $Pr_s$          | $[1]$                             | Prandtlovo kritérium ochlazovaného média        |
| $\dot{Q}_t$     | $[W]$                             | Tepelný výkon ohřívaného média                  |
| $\dot{Q}_s$     | $[W]$                             | Tepelný výkon ochlazovaného média               |
| $\dot{Q}_{sts}$ | $[W]$                             | Střední tepelný výkon                           |
| Re              | $[Pa]$                            | Mez kluzu                                       |
| $Re_t$          | $[1]$                             | Reynoldsovo kritérium ohřívaného média          |
| $Re_s$          | $[1]$                             | Reynoldsovo kritérium ochlazovaného média       |
| Rm              | $[Pa]$                            | Mez pevnosti                                    |
| $R_s$           | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$      | Odpor ochlazovaného média                       |
| $R_{st'}$       | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$      | Odpor stěny trubky                              |
| $R_t$           | $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$      | Odpor na straně ohřívaného média                |
| S               | $[m]$                             | Teplosměnná délka                               |



|                    |                                   |   |
|--------------------|-----------------------------------|---|
| $s$                | $[m]$                             | Tloušťka stěny                                |
| $S_M$              | $[m]$                             | Minimální tloušťka stěny                      |
| $s_s$              | $[m^2]$                           | Průtočná plocha ohřívajícího média            |
| $s_t$              | $[m^2]$                           | Průtočná plocha ochlazovaného média           |
| $s_v$              | $[m]$                             | Tloušťka stěny válcové části                  |
| $t_{st}$           | $[^{\circ}C]$                     | Střední teplota stěny                         |
| $\dot{V}_s$        | $[m^3 \cdot s^{-1}]$              | Průtočné množství ochlazovaného média         |
| $\dot{V}_t$        | $[m^3 \cdot s^{-1}]$              | Průtočné množství ohřívajícího média          |
| $\dot{W}_s$        | $[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ | Vodní ekvivalent ochlazovaného média          |
| $\dot{W}_t$        | $[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ | Vodní ekvivalent ohřívajícího média           |
| $\dot{w}_s$        | $[m \cdot s^{-1}]$                | Rychlost proudění ochlazovaného média         |
|                    |                                   |   |
| $\alpha_s$         | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$   | Součinitel přestupu tepla ochlazovaného média |
| $\alpha_t$         | $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$   | Součinitel přestupu tepla ohřívajícího média  |
| $\Delta p_z$       | $[Pa]$                            | Tlaková ztráta                                |
| $\Delta p_{zC}$    | $[Pa]$                            | Celková tlaková ztráta                        |
| $\Delta t_{str}$   | $[^{\circ}C]$                     | Střední teplotní logaritmický rozdíl          |
| $\lambda$          | $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$   | Tepelná vodivost                              |
| $\lambda_{st'}$    | $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$   | Teplotní součinitel střední teploty           |
| $\dot{v}$          | $[m^2 \cdot s^{-1}]$              | Viskozita                                     |
| $\xi$              | $[1]$                             | Součinitel odporu                             |
| $\rho$             | $[kg \cdot m^{-3}]$               | Střední teplota stěny                         |
| $\sigma$           | $[Pa]$                            | Minimální napětí v tahu                       |
| $\sigma_{D_{min}}$ | $[Pa]$                            | Minimální dovolené napětí v tahu              |
| $\sigma_{Dt,z}$    | $[Pa]$                            | Dovolené napětí materiálu v tahu              |
| $\tau$             | $[s]$                             | Čas   |
| $\varphi$          | $[1]$                             | Součinitel pevnosti                           |

|      |                            |
|------|----------------------------|
| TVD  | Technická voda důležité    |
| HCC  | Hlavní cirkulační čerpadlo |
| I.O. | Primární okruh             |
| HPK  | Hlavní parní kolektor      |
| TG   | Turbogenerátor             |

# 1. Úvod

Dnešní svět má dva hlavní globální problémy – přístup k energetickým zdrojům a negativní vliv na ekologii. Hlavně co se týče skleníkových vlivů na změnu klimatu na planetě. Oba problémy lze řešit jadernou energetikou. Jaderné elektrárny neprodukují žádné skleníkové plyny a je to nejlevnější zdroj energie. Jaderná energetika je výhodná náhrada tepelných elektráren, jelikož zásoby uhlí se zmenšují a cena uhlí se zvyšuje. Na druhé straně budí i rozpaky negativní, které se odrážejí v dnešním světě ze strachu z jaderné havárie, například z aktuální havárie v japonské jaderné elektrárně Fukušima, či jaderné havárie v Černobylu. Některé státy se rozhodly po protestech obyvatel a ekologů zrušit stávající bloky svých JE, jako například Německo.

Za to jaderná energetika v České republice je podstatnou součástí českého energetického mixu a její význam vzroste, až se dokončí stávající dva bloky JE Temelín. Na výstavbu JE Temelín se nabízí tři projekty: USA- Westinghouse reaktor AP 1000; Francie- Areva reaktor EPR; ČR-Rusko- AES reaktor MIR 1200. Moje diplomová práce se zabývá česko - ruským projektem MIR 1200.

MIR 1200 je česko - ruský projekt na výstavbu nového ( třetího ) bloku jaderné elektrárny Temelín. Je to jeden z možných třech kandidátů na výstavbu. České firmy jsou zapojeny do výstavby a výroby komponentů z 80 %. Jedná se o reaktor 3+ generace o hrubém elektrickém výkonu 1158 MW.

V jaderném reaktorů je několik zabezpečovacích systémů proti neřízené štěpné reakci, kterými se zabývá moje diplomová práce. Konkrétně s návrhem tepelného havarijního výměníku.

Tepelné havarijní výměníky, které slouží v případě havárie k dochlazení reaktoru, nebo při plánovaném odstavení bloku. Havarijní výměníky se nacházejí v aktivní zóně primárního okruhu. Médium je silně zředěná kyselina boritá, která snižuje neřízenou štěpnou reakci.

Práci sem rozdělil do pěti fází. V prvním byly vysvětleny havarijní systémy MIR 1200. Dále zbytkový vývin po odstavení reaktorů a plánované odstavení reaktoru.

V druhé fázi jsem udělal pevnostní kontrolu částí havarijního výměníku, zda odpovídají tloušťky trubek a stěn pláště a víka.

V třetí fázi jsem provedl tepelný výpočet celého havarijního výměníku.

Ve čtvrté fázi proběhl hydraulický výpočet havarijního výměníku.

Poslední fázi byl Technologický postup při svařování kroužků víka dna (MIP).

## 2. Základní členění primárního okruhu JE

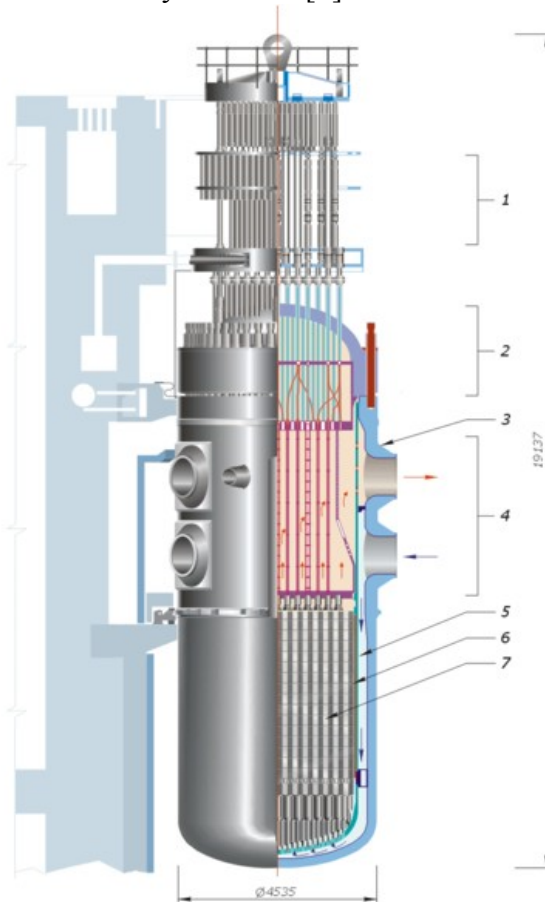
### 2.1 Reaktor

V jaderném reaktorů probíhají řetězové jaderné reakce, lze je kontrolovat a řídit ve stabilním stavu.

Reaktory typu VVER/PWR jsou tlakovodní reaktory, jsou to nejpoužívatelnější reaktory (60 [%] všech typů reaktorů jsou VVER). Reaktory jsou chlazený vodou o vysokém tlaku, jejichž moderátor je voda. Voda slouží jako ochranný prvek reaktorů. Pokud není v reaktorů voda, tak reakce se zastaví. Pára pro turbogenerátor se vyrábí mimo primární okruh v paragenerátoru (viz obr 2.1). [1]

Vnitřní části reaktoru (aktivní zóna) jsou umístěny v **tlakové nádobě**.

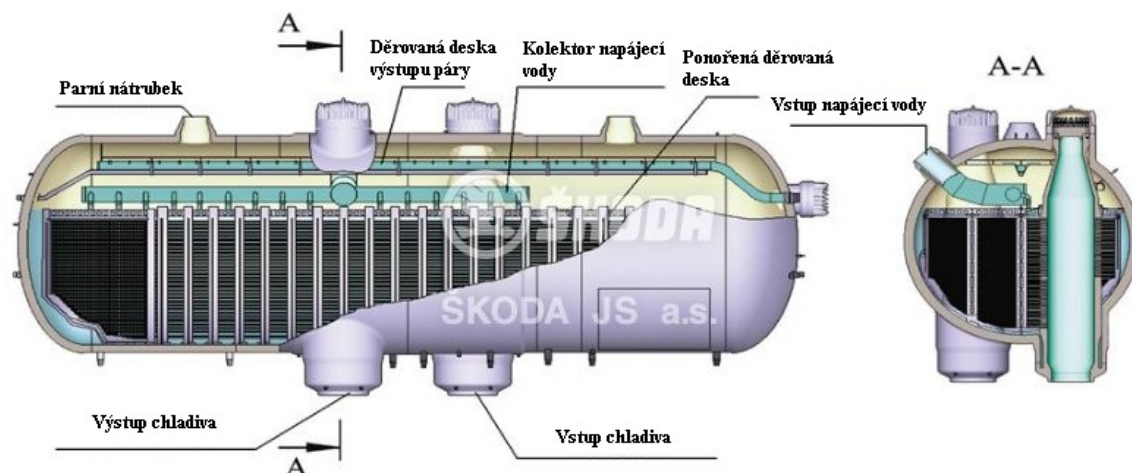
Je zhruba 11 [m] vysoká a má vnější průměr 4,5 [m]. Tloušťka stěny její válcové části je 193 [mm]. Nádobu je navržena na tlak 17,6 [MPa] při teplotě 350 [°C] (provozní tlak je 15,7 [MPa] při teplotě 290 – 320 [°C]). Je vyrobena z nízkoaliovaného chrom-nikl-molybden-vanadové oceli. Ke sledování křehnutí tlakové nádoby v důsledku působení neutronového záření jsou v reaktorů umístěny svědečné vzorky materiálů, které se pravidelně měří a hodnotí. Tato nádoba je opatřena odnímatelným víkem, připevněným hydraulicky předepjatými svorníky a je utěsněna dvěma kovovými samotěsnícími kroužky, jejichž těsnost je nepřetržitě monitorována. Vnitřní části reaktoru tvoří: šachta aktivní zóny, boční plášť (chrání tlakovou nádobu před účinky neutronového záření), blok ochranných trubek. [2]



Obr. 2.1 Schéma reaktoru MIR 1200 [3]

## 2.2 Paragenerátor

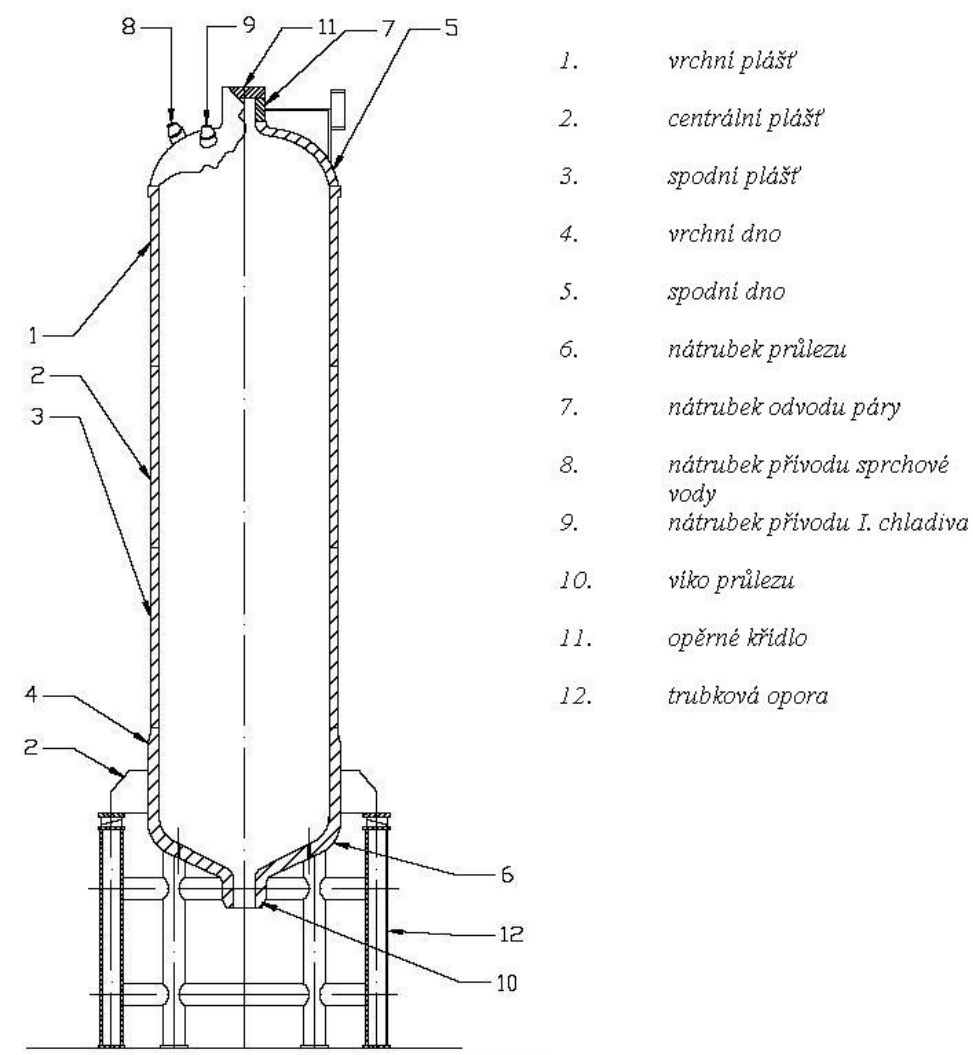
Je to výměník, ve kterém voda primárního okruhu předává své teplo vodě sekundárního okruhu. Vzhledem k tomu, že teplota vody v primárním okruhu je značně vyšší než teplota varu vody v sekundárním okruhu (což je způsobeno vysokým tlakem v primárním okruhu) dochází k mohutnému vývinu páry, která je odváděna na vysokotlaký díl turbíny sekundárního okruhu. Chladicí smyčka primárního (viz obr 2.2). [2]



Obr. 2.2 Paragenerátor MIR 1200 [4]

## 2.3 Kompenzátor objemu

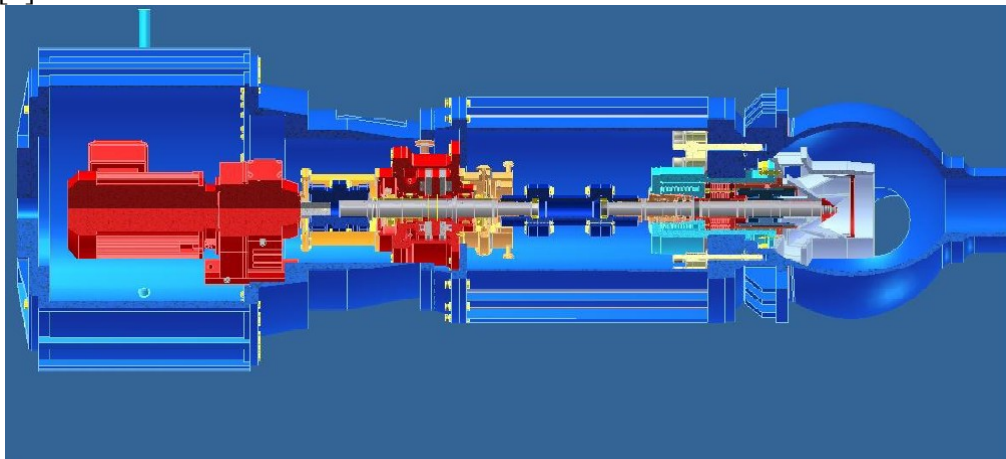
Systém kompenzace objemu je nezávislým systémem reaktorů, je připojen k primárnímu okruhu. Systém vyrovnává tlakové a objemové změny v primárním okruhu jaderné elektrárny, na který mají vliv tepelné dilatace chladiva. Nádoba ve spodní části napojená na horkou větev smyčky, na horní část je napojena studená větev smyčky, dále jsou do ní zabudovány elektrické ohříváky, který vyrovnává změny tlaku a objemu chladiva (viz obr 2.3). [2]



Obr. 2.3 Schéma kompenzátoru objemu [5]

## 2.4 Hlavní cirkulační čerpadla

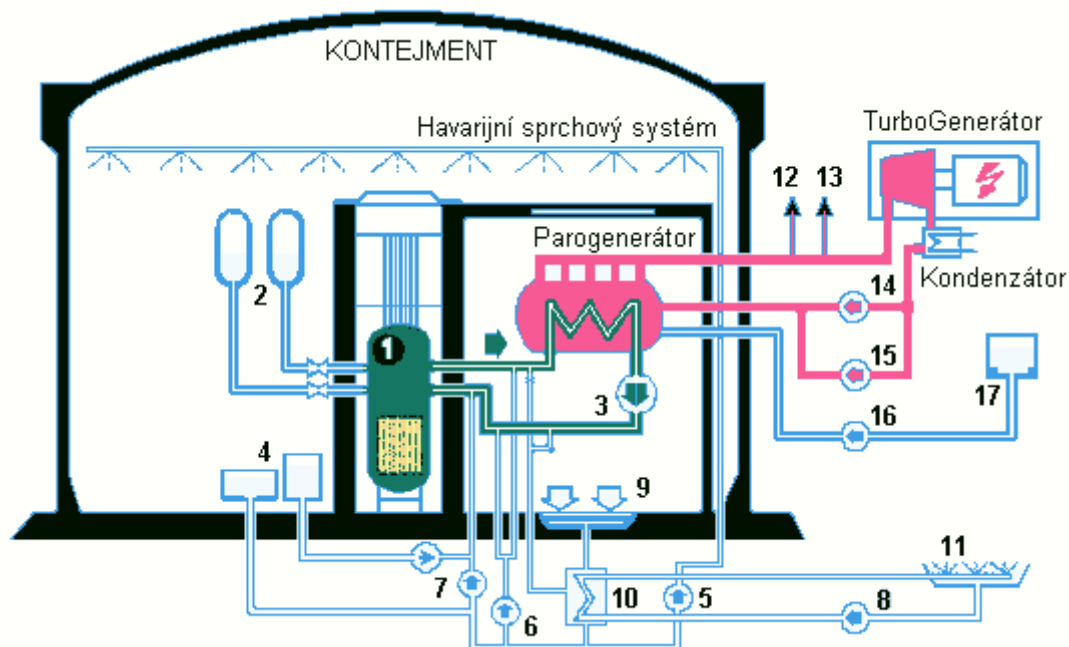
Zajišťuje cirkulaci chladiva (vody) v primárním okruhu odpovídajícímu tepelnému výkonu reaktoru. Jedná se o odstředivé vertikální čerpadlo, na každý blok připadají (viz obr 2.4). [2]



Obr. 2.4 Hlavní cirkulační čerpadlo [6]

## 2.5 Systém doplňování primárního okruhu

Slouží k nastavení požadované koncentraci kyseliny borité, přimíchávané do vody.[2]



- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Reaktor  | 11. Bazény rozstřiku technické vody   |
| 2. Hydroakumulátory   | 12. Pojišťovací ventil paragenerátoru |
| 3. Hlavní cirkulační čerpadlo                                     | 13. Přepouštěcí stanice do atmosféry  |
| 4. Nádrže koncentráту bóru  | 14. Turbonapájecí čerpadla (150 %)    |
| 5. Sprchové čerpadlo ( 3x100 % )                                  | 15. Pomocná napájecí čerpadla         |
| 6. Nízkotlaké doplňovací čerpadlo                                 | 16. Havarijní doplňovací čerpadla     |
| 7. Vysokotlaká vstřikovací čerpadla (600 %)                       | 17. Nádrž demineralizované vody       |
| 8. Čerpadlo technické vody (300 %)                                |                                       |
| 9. Nádrž havarijní zásoby $H_3BO_3$                               |                                       |
| 10. Chladič systému normálního a havarijního dochlazování (300 %) |                                       |

Obr. 2.5 Schéma I. a II. okruhu jaderné elektrárny MIR 1200 [7]

## 3. Havarijní systémy MIR1200

### 3.1 Účel systému

Aktivní havarijní systémy jsou rozděleny na následující systémy (viz. obr. 3.1, 3.2).[8]

- sprchový havarijní systém
- nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny

- c) systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování
- d) systém ohřevu nádrže - jímky havarijní zásoby kyseliny borité

### **3.2 Sprchový systém**

Sprchový systém (viz. obr. 3.3) je určen ke snížení tlaku v hermetické zóně při roztržení potrubí primárního okruhu nebo parovodů sekundárního okruhu ke kterému dojde za provozu bloku. Sprchový systém dále slouží k převádění radioaktivních látek, zejména jódu z paroplynné fáze, vzniklé při porušení těsnosti primárního okruhu, do fáze kapalné. Těmi to dvěma funkcemi zajišťujeme snížení úniků radioaktivních látek do životního prostředí. další funkcí sprchového systému je havarijní zaplnění bazénů skladování vyhořelého paliva v případě poruchy systému chlazení bazénů vyhořelého paliva. [8]

### **3.3 Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování zóny primárního okruhu**

Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny (viz. obr. 3.4) je za provozu bloku určen k:

- havarijnímu dochlazování aktivní zóny reaktoru a následujícímu dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při haváriích spojených s roztržením primárního okruhu, čteně roztržení hlavního cirkulačního potrubí,
- plánovanému dochlazování primárního okruhu při odstavení reaktoru a odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při výměně paliva,
- odvodu zbytkového tepelného výkonu z aktivní zóny při opravách reaktorového zařízení se snížením hladiny chladiva v reaktoru do úrovně osy chladných nátrubků bez demontáže horního bloku (víka reaktoru) a bez vyvážení aktivní zóny. [8]

### **3.4 Systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování**

#### **Systém havarijního vysokotlakého doplňování**

Systém je za provozu bloku určen k havarijnímu doplňování roztoku kyseliny borité do primárního okruhu v režimech spojených s roztěsněním primárního okruhu a s kompenzovatelným únikem do  $130 \text{ [m}^3 / \text{h]}$  při tlaku  $9 \text{ [MPa]}$  a  $100 \text{ [m}^3 / \text{h]}$  při tlaku  $10 \text{ [MPa]}$  (viz. obr. 3.5). [8]

#### **Systém havarijního vysokotlakého vstřikování**

Systém je za provozu bloku určen k havarijnímu doplňování roztoku kyseliny borité do primárního okruhu v režimech spojených s uvolňováním kladné reaktivity v aktivní zóně reaktoru při zachování vysokého tlaku v primárním okruhu (viz. obr. 3.5). [8]

## Systém ohřevu nádrže havarijní zásoby kyseliny borité

Systém je určen k ohřevu nádrže na požadovanou teplotu roztoku kyseliny borité, aby v případě zapracování havarijních systému nedošlo k teplotnímu šoku tlakové nádoby reaktoru. Důsledkem teplotního šoku je možnost porušení tlakové nádoby (prasknutí) vlivem nízké teploty vody dopravované pomocí havarijních systémů z nádrže havarijní zásoby do cirkulačních smyček primárního okruhu (viz. obr. 3.6). [8]

### 3.5 Složení a technický popis systému

#### Složení a umístění systému

##### Sprchový systém

| <i>Název</i>                             | <i>Počet</i> | <i>Označení</i> |
|--|--------------|-----------------|
| Sprchové čerpadlo                        | 3 ks         | TQ11(21,31)D01  |
| Nádrž zásoby roztoku boritanu draselného | 3 ks         | TQ11(21,31)B01  |
| Ejektor                                  | 3 ks         | TQ11(21,31)D02  |
| Sprchové kolektory                       | 3 ks         |                 |
| Sprchové trysky (jeden kolektor)         | 20 ks        |                 |
| Čerpadlo k míchání nádrží                | 1 ks         | TB90D01         |

##### Nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování

| <i>Název</i>                           | <i>Počet</i> | <i>Označení</i> |
|--|--------------|-----------------|
| Nádrž havarijní zásoby kyseliny borité | 1 ks         | TQ10B01         |
| Výměník hav. a norm. dochlazování      | 3 ks         | TQ10(20,30)W01  |
| Čerpadlo hav. a norm. dochlazování     | 3 ks         | TQ12(22,32)D01  |
| Čerpadlo k dopravě na SVO4             | 1 ks         | TB30D04         |

##### Systém havarijního vysokotlakého doplňování

| <i>Název</i>                   | <i>Počet</i> | <i>Označení</i> |
|--------------------------------|--------------|-----------------|
| Vysokotlaké havarijní čerpadlo | 3 ks         | TQ13(23,33)D01  |
| Nádrž zásoby kyseliny borité   | 3 ks         | TQ13(23,33)B01  |

##### Systém havarijního vysokotlakého vstřikování

| <i>Název</i>                     | <i>Počet</i> | <i>Označení</i> |
|----------------------------------|--------------|-----------------|
| Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo | 3 ks         | TQ14(24,34)D01  |
| Nádrž zásoby kyseliny borité     | 3 ks         | TQ14(24,34)B01  |

##### Systém ohřevu nádrže - jímky

| <i>Název</i>    | <i>Počet</i> | <i>Označení</i> |
|-----------------|--------------|-----------------|
| Čerpadlo ohřevu | 2 ks         | TQ51(52)D01     |
| Výměník ohřevu  | 2 ks         | TQ51(52)W01     |



## 3.6 Technický popis zařízení

### 3.6.1 Sprchový systém

#### Sprchové čerpadlo na HVB I

Sprchové čerpadlo (výrobce SUMA bývalý SSSR) je odstředivé, horizontální, jednostupňové s dvoustranným oběžným kolem a oboustranným vstupem. Je složeno z tělesa, rámu, rotoru, ložisek a koncových čelních těsnění (viz. obr. 3.8).

Rotor čerpadla je složen z hřídele, oběžného dvoustranného kola, distančních objímek a olejových rozstřikovacích kroužků. Je uložen v kluzných ložiskách, mazaných rozstřikovacími kroužky. Olejová náplň ložisek je chlazená technickou vodou důležitou. Osové síly rotoru jsou zachyceny zdvojeným radiálně axiálním kuličkovým ložiskem v zadní ložiskovém stojanu.

Elektromotor je třífázový, asynchronní s otevřeným systémem chlazení. Elektromotor je složen ze statoru s vinutím, rotoru, štítů, ložiskových stojanů, výměníků, pláště a přívodní krabice elektroinstalace. [8]

#### Sprchové čerpadlo na HVB II

Sprchové čerpadlo typ SULZER - ZE 200-5400 (viz. obr. 3.12, 3.13) je odstředivé, horizontální, jednostupňové, průtokové pouze jedním směrem s axiálním vstupem a radiálním výstupem s letmo uloženým oběžným kolem, s kruhovým krytem upevněným ke spodní desce. Kryt čerpadla je vyrobený z kované oceli. Stacionárním difusérem umístěným za rotorem ve směru toku je zefektivněna transformace rychlostní energie.

Vnitřní komora čerpadla je u hřídele zapečetěná mechanickými ucpávkami. Těleso ucpávky je složeno ze dvou mechanických ucpávek (vnitřní a vnější), které jsou sestaveny "zády" k sobě. Dvojitá ucpávka T58B je výrobkem firmy John Crane. Prostor mezi ucpávkami je zaplněn blokovací (bariérovou) kapalinou - čistým kondenzátem a je vněm udržován tlak minimálně 0,2 [MPa] vyšší než je tlak sání. Tím je dosaženo dokonalejšího utěsnění vnějšího kluzného kroužku a prakticky zabráněno prosakování přečerpávané kapaliny.

Okruh bariérové kapaliny je tvořen tlakovou nádobou - termosifonem CTS 101 o objemu cca 8 [l] s chladicím hadem o výkonu až 4 [kW], ruční doplňovací pumpičkou (kterou se přečerpává čistý kondenzát do tlakové nádoby - termosifonu a lze tak i dopravit tlak) stavoznakem, teploměrem a systémem ventilů pro případné úpravy tlaku v okruhu. V současnosti je používána pro natlakování termosifonu 10 [l] bomba s dusíkem. Termosifon je trubkami o světlosti 18 [mm] spojen s ucpávkovou komorou čerpadla a v systému je nucená cirkulace bariérové kapaliny pomocí čerpací spirály na vnější (atmosférické) ucpávky.

Ložisková konzola je osazena na přední straně válečkovým ložiskem, na zadní straně dvěma ložisky s kosoúhlým stykem k zachycení axiální síly. Mezi ložisky je na hnacím hřídeli rozstřikovací kroužek. Objem olejové náplně se kontroluje podle olejoznaku na boku konzoly, kde je zároveň skleněná doplňovací nádobka pro udržení potřebné hladiny oleje. Teplota oleje je přes teploměrnou jímku zaústěnou do ložiskové konzoly a měřicí okruh zobrazován na blokové a nouzové dozorně. Ložiskový olej je chlazen pomoci žebrovaní na konzole.

Elektromotor typ ABB - HXR 400 LF2 je třífázový, asynchronní, chlazený vzduchem pomocí ventilátoru a žeber na tělese statoru. [8]

| <b><i>Základní parametry</i></b> | <b>HVB I</b>           | <b>HVB II</b>          |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Průtok                           | 700 $[m^3 / h]$        | 700 $[m^3 / h]$        |
| Výtlak                           | 1,4 $[MPa]$            | 1,4 $[MPa]$            |
| Otáčky                           | 2970 $[ot / min]$      | 2980 $[ot / min]$      |
| Dovolená kavitační rezerva       | 11 $[m]$               | 9,5 $[m]$              |
| Tlak na sání                     | 2,2 $[MPa]$            | 2,2 $[MPa]$            |
| Teplota čerp. media              | 10 - 100 $[^{\circ}C]$ | 10 - 150 $[^{\circ}C]$ |
| Výkon elektromotoru              | 500 $[kW]$             | 420 $[kW]$             |
| Napětí                           | 6 $[kV]$               | 6 $[kV]$               |

### **Nádrž zásoby roztoku boritanu draselného**

Nádrž je válcová, vertikální z nerezového plechu (viz. obr. 3.9) Na nádrži jsou dva otvory, pro kontrolu vnitřku nádrže a zavážecí otvor. V zavážecím otvoru je umístěn násypný koš, který se používá pro rozpouštění chemických reagentů. [8]

| <b><i>Základní parametry</i></b> |  |
|----------------------------------|--|
| Celkový objem                    | 6 $[m^3]$  |
| Tlak na sání                     | atmosférický   |
| Teplota roztoku                  | teplota okolního prostředí   |
| Roztok                           | 150-160 $[g / kg_{H_3BO_3}]$<br>105 $[g / kg_{K^+}]$<br>15 $[g / kg_{N_2H_4}]$ |

### **Ejektory (vodoproudé čerpadlo)**

(viz. obr. 2.10) [8]

| <b><i>Základní parametry</i></b>      |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| Průtok pracovního roztoku             | 50 $[m^3 / h]$   |
| Průtok přečerpávaného roztoku         | 5-11 $[m^3 / h]$ |
| Tlak pracovního roztoku na vstupu     | 0,7-1,2 $[MPa]$  |
| Tlak přečerpávaného roztoku na vstupu | 0,1 $[MPa]$      |
| Tlak směsi na výstupu                 | 0,4-0,7 $[MPa]$  |

### **Sprchové trysky**

(viz. obr. 2.11) [8]

| <b><i>Základní parametry</i></b> |
|----------------------------------|
|----------------------------------|

|                                 |                               |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Počet trysek v jednom kolektoru | 20 ks                         |
| Průtok tryskou                  | $30 \text{ [m}^3 / \text{h]}$ |
| Úhel rozstříku                  | $>75^\circ$                   |
| Tlaková ztráta na trysce        | $0,1 \text{ [MPa]}$           |

### **Čerpadlo k míchání nádrží**

Čerpadlo k míchání nádrží je jednostupňové, odstředivé, horizontální, spirální konstrukce s letmo uloženým oběžným kolem (viz. obr. 3.21). Hřídel čerpadla je uložený v ložiskové konzole ve valivých ložiskách, která jsou mazána olejem. Ložisková konzole je spojena s hydraulickou částí tzv. lucernou, která je ve styku se spirálou a víkem utěsněna kroužky kruhového průřezu. Tak je kolem ucpávkového prostoru vytvořena komora, kterou lze využít k chlazení přívodem studené vody. Ucpávkový prostor ve víku čerpadla je chlazen a proplachován vodou z výtlaku čerpadla. čerpadlo je spojeno s elektromotorem pružnou spojkou. [8]

#### ***Základní parametry***

|                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| Výtlak              | $0,177 \text{ [MPa]}$           |
| Průtok              | $8,28 \text{ [m}^3 / \text{h]}$ |
| Hmotnost            | $119 \text{ [kg]}$              |
| Výkon elektromotoru | $3 \text{ [kW]}$                |
| Napětí              | $380 \text{ [V]}$               |
| Otáčky              | $2850 \text{ [ot / min]}$       |

### **3.6.2 Nízkotlakový systém havarijního a normálního dochlazování primárního okruhu**

#### **Nádrž havarijní zásoby roztoku kyseliny borité**

Nádrž je tvořena místností ve tvaru písmene L a její stěny jsou tvořeny dvojitou obličovkou (viz. obr. 3.7, 3.14, 3.15). Z prostoru mezi stěnami obličovky je vyvedena soustava drenáží pro kontrolu těsnosti nerezové obličovky (vnější, druhá stěna je uhlíková). Ve spodní části jsou do nádrže svedeny tři vtoky pro jímání chladicí vody v kontejnmentu. Tyto vtoky ústí jednotlivě do tří nečistých částí nádrže, oddělených od společné čisté části soustavou šesti vertikálních sít s různou velikostí oka. Síta slouží k zachytávání nečistot. V podlaze čisté části nádrže jsou umístěny tři výtoky k jednotlivým divizím havarijních systémů. Nad každým výtokem v nádrži je instalován mříž víru k eliminaci přísávání vzduchu při nižších hladinách chladiva. Nádrž slouží jako zdroj kyseliny borité pro systém a v případě havárie slouží pro sběr uvolněného chladiva a tím vytvoření dostatečné zásoby vody pro havarijní systémy a vytvoření vodního cyklu chlazení aktivní zóny. [8]

#### ***Základní parametry***

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| Minimální objem         | 580 $[m^3]$          |
| Pracovní objem          | 635 $[m^3]$          |
| Teplota roztoku         | 55-60 $[^{\circ}C]$  |
| Plocha dna              | 181 $[m^2]$          |
| Koncentrace kys. borité | $\geq 12$ $[g / kg]$ |

### Výměník havarijního (normálního) dochlazování

Výměník je jednotělesový, horizontální, plášťového typu, dvouchodý v trubkovém i mezitrubkovém prostoru s protiproudým pohybem medií (viz. obr. 3.16). Je určen k chlazení primárního chladiva v případě plánovaného dochlazování a k chlazení uniklého primárního chladiva v případě havarijního dochlazování primárního okruhu. Chlazené médium (primární voda) protéká mezitrubkovým prostorem, chladicí médium (technická voda důležitá) trubkovým prostorem. [8]

| parametr          | rozměr        | plánované dochlazování |              | havarijní dochlazování |              |
|-------------------|---------------|------------------------|--------------|------------------------|--------------|
|                   |               | trubkový               | mezitrubkový | trubkový               | mezitrubkový |
| medium            |               | TVD                    | $H_3BO_3$    | TVD                    | $H_3BO_3$    |
| průtok media      | $[m^3 / h]$   | 3000                   | 200-750      | 3000                   | 1500         |
| pracovní tlak     | [MPa]         | 0,3-0,6                | 2,1          | 0,3-0,6                | 2,1          |
| teplota media     |               |                        |              |                        |              |
| na vstupu         | $[^{\circ}C]$ | 5÷40                   | 150-60       | 40                     | 150          |
| na výstupu        | $[^{\circ}C]$ | dle bilance            | 70           | 70                     | 90           |
| hydraulický odpor | [MPa]         | 0,045                  | 0,02         | 0,045                  | 0,02         |
| teplosměná plocha | $[m^2]$       | 996                    |              |                        |              |
| objem             | $[m^3]$       | 5,07                   | 4,85         |                        |              |
| zkušební tlak     | [MPa]         | 0,9                    | 3,15         |                        |              |
| hmotnost          | [kg]          | 35230                  |              |                        |              |
| délka/průměr      | [mm]          | 6850/1750              |              |                        |              |

### Čerpadlo havarijního (normálního) dochlazování na HVB I

Nízkotlaké čerpadlo (výrobce SUMA bývalý SSSR) je odstředivé, horizontální, jednostupňové s dvoustranným oběžným kolem a oboustranným vstupem. Čerpadlo je složeno z tělesa, rámu, rotoru, ložisek a koncových čelních těsnění (viz. obr. 3.8).

Těleso čerpadla je odlitek s oboustranným polospirálním vstupem a spirálním dvojitém výstupem s horizontální dělicí rovinou. V místě utěsnění oběžného kola a tělesa čerpadla jsou těsnící prstence.

Rotor je složen z hřídele, oběžného dvoustranného kola, distančních objímek a olejových odstřikovacích kroužků. Je uložen v kluzných ložiskách, mazaných rozstřikovacími kroužky. Olejová náplň ložisek je chlazená technickou vodou důležitou. Osové síly rotoru jsou zachyceny zdvojeným radiálně axiálním kuličkovým ložiskem zadním ložiskovým stojanu.

Elektromotor je třífázový, asynchronní s otevřeným systémem chlazení. Elektromotor je složen ze statoru s vinutím, rotoru, štítů, ložiskový stojanů, výměníku, pláště a přívodní krabice elektroinstalace. [8]

## Čerpadlo havarijního (normálního) dochlazování na HVB II

Nízkotlaké čerpadlo typ SULZER - REL 200-450 je odstředivé, horizontální, jednostupňové, průtokové pouze jedním směrem s axiálním výstupem a radiálním výstupem s letmo uloženým oběžným kolem, s kruhovým krytem upevněným ke spodní desce. (viz. obr. 3.12) Kryt čerpadla je vyrobený z kované oceli. Stacionárním difusérem umístěným za rotorem ve směru toku je zefektivněná transformace rychlostní energie.

Vnitřní komora čerpadla je u hřídele zapečetěna mechanickými ucpávkami. Těleso ucpávky je složeno ze dvou mechanických ucpávek (vnitřní a vnější), které jsou sestaveny "zády" k sobě. Dvojitá ucpávka T58B je výrobkem firmy John Crane. Prostor mezi ucpávkami je zaplněn blokovací (bariérovou) kapalinou - čistým kondenzátem a je v něm udržován tlak minimálně o 0,2 [MPa] vyšší než je tlak v sání. Tím je dosaženo dokonalejšího utěsnění vnějšího kluzného kroužku a prakticky zabráněno prosakování přečerpávané kapaliny.

Okruh bariérové kapaliny je tvořen tlakovou nádobou - termosifonem CTS 101 o objemu cca 8 [l] s chladícím hadem o výkonu až 4 [kW], ruční doplňovací pumpičkou (kterou se přečerpává čistý kondenzát do tlakové nádoby - termosifonu a lze tak i dopravit tlak) stavoznakem, teploměrem a systémem ventilů pro případné úpravy tlaku v okruhu. V současnosti je používána pro natlakování termosifonu 10 [l] bomba s dusíkem. Termosifon je trubkami o světlosti 18 [mm] spojen s ucpávkovou komorou čerpadla a v systému je nucená cirkulace bariérové kapaliny pomocí čerpací spirály na vnější (atmosférické) ucpávky.

Ložisková konzola je osazena na přední straně válečkovým ložiskem, na zadní straně dvěma ložisky s kosoúhlým stykem k zachycení axiální síly. Mezi ložisky je na hnacím hřídeli rozstřikovací kroužek. Objem olejové náplně se kontroluje podle olejoznaku na boku konzoly, kde je zároveň skleněná doplňovací nádobka pro udržení potřebné hladiny oleje. Teplota oleje je přes teploměrnou jímku zaústěnou do ložiskové konzoly a měřicí okruh zobrazován na blokové a nouzové dozorně. Ložiskový olej je chlazen pomocí žebrovaní na konzole.

Elektromotor typ ABB - HXR 500 MF2 je třífázový, asynchronní, chlazený vzduchem pomocí ventilátoru a žeber na tělese statoru. [8]

| <b>Základní parametry</b>  | <b>HVB I</b>             | <b>HVB II</b>            |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Průtok                     | 800 [m <sup>3</sup> / h] | 800 [m <sup>3</sup> / h] |
| Výtlak                     | 2,3 [MPa]                | 2,3 [MPa]                |
| Otáčky                     | 2980 [ot / min]          | 2980 [ot / min]          |
| Dovolená kavitační rezerva | 11 [m]                   | 9,5 [m]                  |
| Tlak na sání               | 2,2 [MPa]                | 2,25 [MPa]               |
| Teplota čerp. media        | 10 - 100 [°C]            | 10 - 150 [°C]            |
| Výkon elektromotoru        | 800 [kW]                 | 800 [kW]                 |
| Napětí                     | 6 [kV]                   | 6 [kV]                   |
| Výkon čerpadla             | 690 [kW]                 | 668 [kW]                 |

## Čerpadlo k odpouštění havarijní nádrže

Čerpadlo je jednostupňové, odstředivé, horizontální, spirální konstrukce s letmo uloženým oběžným kolem.

Hřídel je uložen v ložiskové konzole ve valivých ložiskách, která jsou mazána olejem. Ložisková konzole je spojena s hydraulickou částí tzv. lucernou, která je ve styku se spirálou a víkem utěsněna kroužky kruhového průřezu. Tak je kolem ucpávkového prostoru vytvořena komora, kterou lze využít k chlazení přívodem studené vody. Ucpávkový prostor ve víku čerpadla je chlazen a proplachován vodou vlastní spotřeby. Čerpadlo je spojeno s elektromotorem pružnou spojkou. [8]

### *Základní parametry*

|                            |                     |
|----------------------------|---------------------|
| Průtok                     | 45 [ $m^3 / h$ ]    |
| Výtlak                     | 0,9 [ $MPa$ ]       |
| Povolená kavitační rezerva | 1,8 [ $m$ ]         |
| Otáčky                     | 2935 [ $ot / min$ ] |
| Výkon                      | 22 [ $kV$ ]         |
| Napětí                     | 380 [ $V$ ]         |
| Hmotnost agregátu          | 375 [ $kg$ ]        |

## 3.6.3 Systém havarijního vysokotlakého doplňování

### Vysokotlaké havarijní čerpadlo

Čerpadlo je odstředivé, osmistupňové, horizontální s monolitním vnějším tělesem a mnohosekčným vnitřním tělesem, s hydropatou, s kluznými ložisky (s kruhovým mazáním) a s koncovým čelním těsněním (viz. obr. 3.18). Ložiska a těsnění jsou chlazena technickou vodou důležitou.

Rotor čerpadla je složen z hřídele, 8 oběžných kol s přivařenými těsnicími kroužky, odlehčovacího kotouče, rotujících částí čelního těsnění a spojkové příruby. Pro zachycení osových sil, které vznikají z rozdílů tlaků na předních a zadních stranách oběžných kol, je čerpadlo opatřeno hydropatou. Ta je složena z vyrovnávacího kotouče na rotoru čerpadla a opěrného kotouče v zadním víku vnějšího tělesa. Při práci čerpadla je vůle mezi opěrným a vyrovnávacím kotoučem několik desetin milimetru a je vyplněna vodním filmem. Kapalina z hydropaty je zavedena zpět sání čerpadla. Pro případ náhle netěsnosti ucpávky jsou víka vnějšího tělesa opatřena manžetou k zabránění úniku radioaktivního roztoku z čerpadla.

K zamezení krystalizace kyseliny borité v ucpávce a pro zabezpečení dostatečného mazání vnitřní strany manžety jsou tyto části nepřetržitě omývány čistým kondenzátem. Tato promývací voda je odváděna do drenáže. Čerpadlo je spojeno s elektromotorem zubovou spojkou. [8]

### ***Základní parametry***

|                            |                         |
|----------------------------|-------------------------|
| Průtok                     | 160 [ $m^3 / h$ ]       |
| Výtlač                     | 9,8 [ $MPa$ ]           |
| Tlak na sání               | 0,05-0,65 [ $MPa$ ]     |
| Otáčky                     | 2978 [ $ot / min$ ]     |
| Čerpané medium             | roztok kyseliny borité  |
| Povolená kavitační rezerva | 12 [ $m$ ]              |
| Teplota čerpané kapaliny   | max. 95 [ $^{\circ}C$ ] |
| Výkon elektromotoru        | 835 [ $kW$ ]            |
| Napětí                     | 6 [ $kV$ ]              |
| Hmotnost čerpadla          | 4540 [ $kg$ ]           |

### **Nádrž zásoby roztoku kyseliny borité**

Nádrž má var kvádru, vyrobeného z nerezového plechu. V hodní části nádrže je otvor pro možnost kontroly vnitřního povrchu (viz. obr. 3.17). [8]

### ***Základní parametry***

|                         |                     |
|-------------------------|---------------------|
| Objem                   | 15 [ $m^3$ ]        |
| Koncentrace kys. borité | 40 [ $g / l$ ]      |
| Tlak                    | jako v kontejnmentu |
| Teplota roztoku         | okolní prostředí    |

## **3.6.4 Systém havarijního vysokotlakého vstřikování**

### **Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo**

Čerpadlo je horizontální tříplunžrové, s klikovým mechanismem a s převodovkou (viz. obr. 3.20). Klikový hřídel je uložen ve dvou válečkových valivých ložiskách, umístěných v nálitcích tělesa. Jeden konec klikového hřídele je spojen pružnou spojkou s reduktorem, druhý konec pohání zubové čerpadlo olejového systému. Ze strany reduktoru je klikový hřídel těsněn manžetou proti úniku oleje.

Pístnice prochází ucpávkovým blokem, ve kterém je sada manžet a kroužků s rozpěrnou pružinou a tím je zabráněno úniku hydrozávěrné kapaliny, která maže ucpávky pístnice a udržuje tlak v prostoru za pístem. Pístnice je chlazená technickou vodou důležitou. Kolektor hydrozávěru je sestaven ze spojovacího potrubí, nálevky s víkem a pojistného pružinového ventilu, který udržuje tlak v prostoru za pístem do 0,25 [ $MPa$ ].

Přepad z pojistného ventilu je zaveden do speciální kanalizace. Kapalina v hydrouzávěru je čistý kondenzát. Shora je těleso čerpadla opatřeno otvorem pro nalití oleje s odvzdušňovacím víkem. Kontrola oleje se provádí podle olejovému na boku tělesa čerpadla. Olejový systém je určen k mazání smýkadel a jejich vodících pouzder, ojnicích a klikových ložisek. [8]

#### ***Základní parametry***

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| Dopravované množství | 6,3 [ $m^3 / h$ ]    |
| Výtlak nominální     | 16 [ $MPa$ ]         |
| počet dvojzdvihů     | 38-50 [ $ot / min$ ] |
| Průměr plunžru       | 50 [ $mm$ ]          |
| Ucpávky              | manžetové            |
| Výkon elektromotoru  | 55 [ $kW$ ]          |
| Napětí               | 220/380 [ $V$ ]      |
| Otáčky               | 1470 [ $ot / min$ ]  |
| Hmotnost agregátu    | 2550 [ $kg$ ]        |

#### **Nádrž zásoby roztoku kyseliny borité**

Vertikální válcová nádoba vyrobená z nerezových materiálů. V horní části opatřena průřezem pro možnost kontrol vnitřního povrchu (viz. obr. 3.19). [8]

#### ***Základní parametry***

|                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| Objem                   | 15 [ $m^3$ ]      |
| Koncentrace kys. borité | 40 [ $g / l$ ]    |
| Tlak                    | jako v kontejneru |
| Teplota roztoku         | okolní prostředí  |

### **3.6.5 Systém ohřevu jímky**

#### **Čerpadlo k ohřevu nádrže**

Čerpadlo je jednostupňové, odstředivé, horizontální, spirální konstrukce s letmo uloženým kolem s axiálním vstupem a radiálním výstupem. Ucpávka je zahlcována z výtlaku čerpadla, úniky jsou odváděny do systému sběru bóru, Hřídel je uložen v ložiskové konzole ve valivých ložiskách mazaných olejem. [8]

#### ***Základní parametry***

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| Průtok                     | 50 [ $m^3 / h$ ]       |
| Výtlak                     | 0,5 [ $MPa$ ]          |
| Otáčky                     | 3000 [ $ot / min$ ]    |
| Čerpané medium             | roztok kyseliny borité |
| Povolená kavitační rezerva | 4,5 [ $m$ ]            |
| Teplota čerpané kapaliny   | do 90 [ $^{\circ}C$ ]  |
| Výkon elektromotoru        | 15 [ $kW$ ]            |
| Napětí                     | 380 [ $V$ ]            |
| Hmotnost čerpadla          | 80 [ $kg$ ]            |
| Hmotnost elektromotoru     | 130 [ $kg$ ]           |



## Výměník k ohřevu nádrže

Výměník je jednotělesový, vertikální s protiproudým pohybem médií. [8]

### *Základní parametry*

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| Průtok                        | 140 [ $m^3 / h$ ]      |
| Čerpané medium                | roztok kyseliny borité |
| Teplota na vstupu             | 45 [ $^{\circ}C$ ]     |
| Teplota na výstupu            | 65 [ $^{\circ}C$ ]     |
| Průtok páry                   | 7 [ $t / h$ ]          |
| Teplota páry na vstupu        | 110 [ $^{\circ}C$ ]    |
| Teplota kondenzátu na výstupu | 55 [ $^{\circ}C$ ]     |
| Trplosměnná plocha            | 27 [ $m^2$ ]           |
| Hmotnost plného výměníku      | 1820 [ $kg$ ]          |
| Délka                         | 5266 [ $mm$ ]          |
| Průměr                        | 325 [ $mm$ ]           |

## 3.7 Funkční popis systému

### 3.7.1 Sprchový systém

Sprchový systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3x100 [%]. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, nádrže chemických reagentů, havarijního výměníku, armatur, sprchových trysek a spojovacího potrubí.

Sprchové čerpadlo má na své sání přiveden roztok kyseliny borité ze společné nádrže havarijní zásoby. Sací potrubí je společné pro nízkotlaký systém havarijního a normálního doplňování a systém havarijního vysokotlakého doplňování. Do sání sprchového čerpadla je přísáván ejektorem roztok chemických reagentů z nádrže za účelem vyvážení radioaktivních izotopů jódu v kontejnmentu v případě havárie spojené s roztržením primárního okruhu. Pracovní kapalina pro ejektor je přivedena z výtlačku sprchového čerpadla. Nádrž chemických reagentů se zaváží hydroxidem draselným, kyselinou boritou a hydrazinem. Na přípravu roztoku je do nádrže přiveden čistý kondenzát. Promíchávání roztoku se provádí pomocí čerpadla, až do úplného rozmíchání roztoku. Čerpadlo je společné pro všechny tři sprchové systémy. Pomocí tohoto čerpadla se též provádí periodické promíchání nádrží za provozu bloku na výkonu.

Výtlačk sprchového čerpadla je opatřen recirkulační trasou (přes výměník havarijního dochlazování), která se využívá pro odzkoušení funkčnosti sprchového čerpadla. Výtlačná trasa čerpadla je zaústěna do sprchových trysek, které jsou umístěny pod kopulí kontejnmentu. V případě havárie spojené s únikem chladiva dochází ke sprchování vnitřních prostor kontejnmentu. Sprchováním dochází ke kondenzaci parních složek a tím ke snížení tlaku uvnitř kontejnmentu.

Z výtlačné trasy sprchových čerpadel je také možno provádět havarijní zaplnění bazénů vyhořelého paliva. Toto propojení provádí operátor z blokové dozorny. [8]

### 3.7.2 Nízkotlaký systém havarijního dochlazování

Nízkotlaký systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3x100 [%]. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, havarijního výměníku, dochlazovacího kolektoru, armatur a spojovacího potrubí.

Sání čerpadel havarijního a normálního dochlazování primárního okruhu (nízkotlakých) je připojeno přes výměník na nádrž zásoby kyseliny borité. Obsah vod této nádrže je možno čistit na čistící stanici vod bazénů a nádrží. Z nádrží systému se též provádí zaplnění nádrže havarijního systému. Sací potrubí nízkotlakého systému je společné pro systém vysokotlaký a sprchový. Výtlak nízkotlakých čerpadel je zaústěn:

- do studené a horké větve cirkulační smyčky
- do výtlačných tras hydroakumulátoru

Výtlačné trasy čerpadla jsou před připojením na cirkulační smyčku opatřeny dýzami, které jsou určeny pro omezení průtoku vody vytékající z primárního potrubí v případě roztržení výtlačných tras nízkotlakého systému. Výtlak nízkotlakých čerpadel je opatřen malou a velkou recirkulační trasou. Případné úniky z primárního okruhu přes zpětné klapky jsou z výtlačných tras vedeny do systému organisovaných úniků. [8]

### 3.7.3 Systém havarijního vysokotlakého doplňování

Vysokotlaký systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3x100 [%]. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, havarijního výměníku, dochlazovacího kolektoru, armatur a spojovacího potrubí.

Do sání vysokotlakých havarijních čerpadel je přiváděn 40 [g] roztok kyseliny borité  $40[g]H_3BO_3/[kg]H_2O$  se zásobní nádrže kyseliny borité. Po vyčerpání obsah této nádrže je sání vysokotlakých čerpadel automaticky přepojen na sání kolektorů čerpadel z havarijní nádrže.

Výtlak vysokotlakých havarijních má dvě trasy. První trasa je recirkulační a je zaústěna na zpět do nádrže. Je určena k vyzkoušení čerpadel v režimu kdy blok pracuje na výkonu, a v havarijním režimu tato trasa slouží jako rozběhová. Druhá trasa je hlavní a je zaústěna společně s odpovídajícím vysokotlakým systémem ze společného kolektoru.

Pro spolehlivý chod jsou čerpací agregáty chlazený technickou vodou důležitou. U elektromotorů jsou chlazený olejové náplně v ložiskových vanách a statorové vinutí, u čerpadel jsou chlazený olejové náplně v ložiskových vanách a ucpávky. Pro zamezení krystalizace kyseliny borité na čelních těsněních čerpadel jsou tato místa omývána čistým kondenzátem. [8]

### **3.7.4 Systém havarijního vysokotlakého vstřikování**

Vysokotlaký systém je tvořen třemi kanály, které jsou vzájemně nezávislé z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládání. Každý systém (kanál) je schopen sám zajistit požadované funkce, tj. je zálohován 3x100 [%]. Každá skupina (systém) se skládá z čerpadla, havarijního výměníku, dochlazovacího kolektoru, armatur a spojovacího potrubí.

Do sání čerpadel je přiváděn roztok čtyřiceti gramové kyseliny borité z nádrže. Po vyčerpání této nádrže je automaticky odstaveno.

Výtlaček vysokotlakých vstřikovacích čerpadel se spojuje s výtlačkem vysokotlakých havarijních čerpadel. Vlastní výtlačné potrubí má dvě své trasy. První je trasa recirkulační a je zaústěna do nádrže zásoby roztoku kyseliny borité. Druhá trasa je zaústěná na společnou trasu.

Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo je spojeno s elektromotorem přes reduktor s měnitelným převodovým poměrem. Reduktor má vlastní olejovou náplň a převody a ložiska jsou mazány rozstřikem. [8]

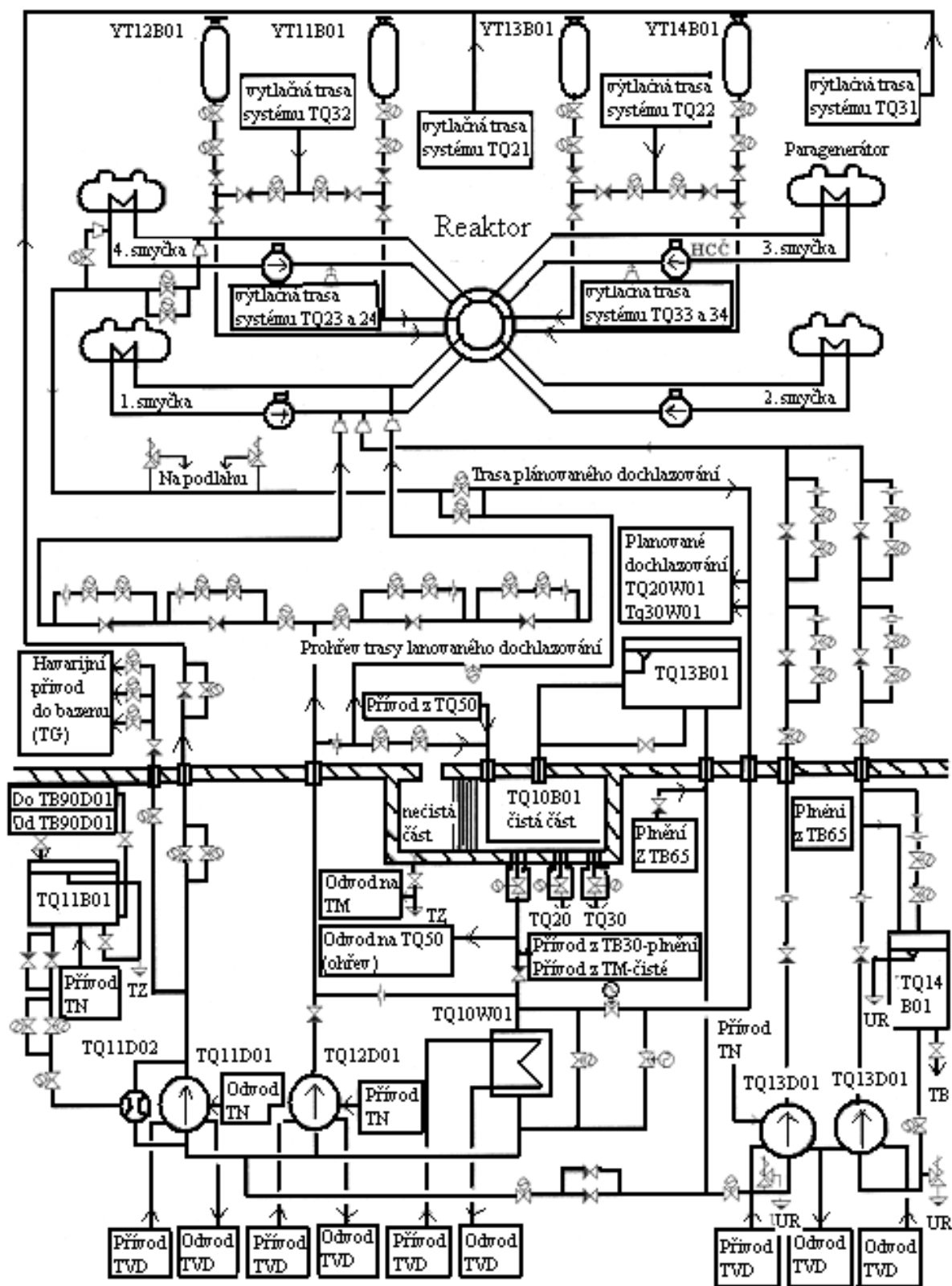
### **3.7.5 Systém ohřevu nádrže - jímky havarijní zásoby kyseliny borité**

Systém se skládá ze dvou shodných tras, tvořených čerpadlem, výměníkem a spojovacím potrubím s armaturami. Každý kanál může pracovat samostatně, nebo mohou pracovat společně pro zrychlení ohřevu havarijní nádrže.

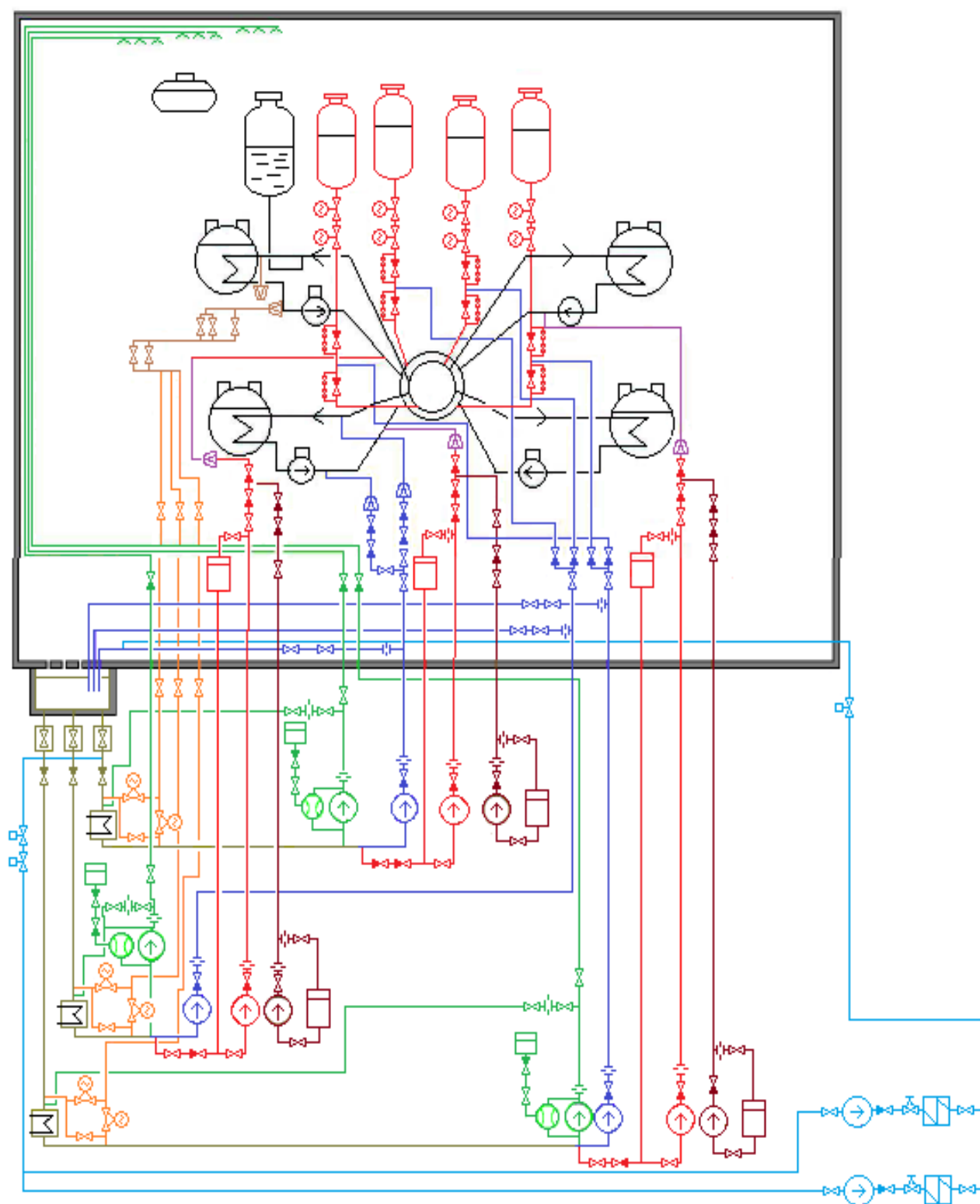
Přívod na sání čerpadel je napojen na potrubí DN600 (úsek mezi havarijní nádrží a havarijním výměníkem) a je vybaven dvěma rychločinnými armaturami. Za těmito armaturami se dělí do paralelních tras s čerpadly a výměníky a dále se zase spojuje do společné potrubní trasy, která prochází hermetickou průchodkou do hermetického prostoru a vede zpět do havarijní nádrže. Před a za hermetickou průchodkou je rychločinná armatura.

Přívod páry je ze strojovny, společná trasa se dělí na dvě paralelní trasy k výměníkům a vzniklý kondenzát se odvádí společnou trasou zpět do strojovny.

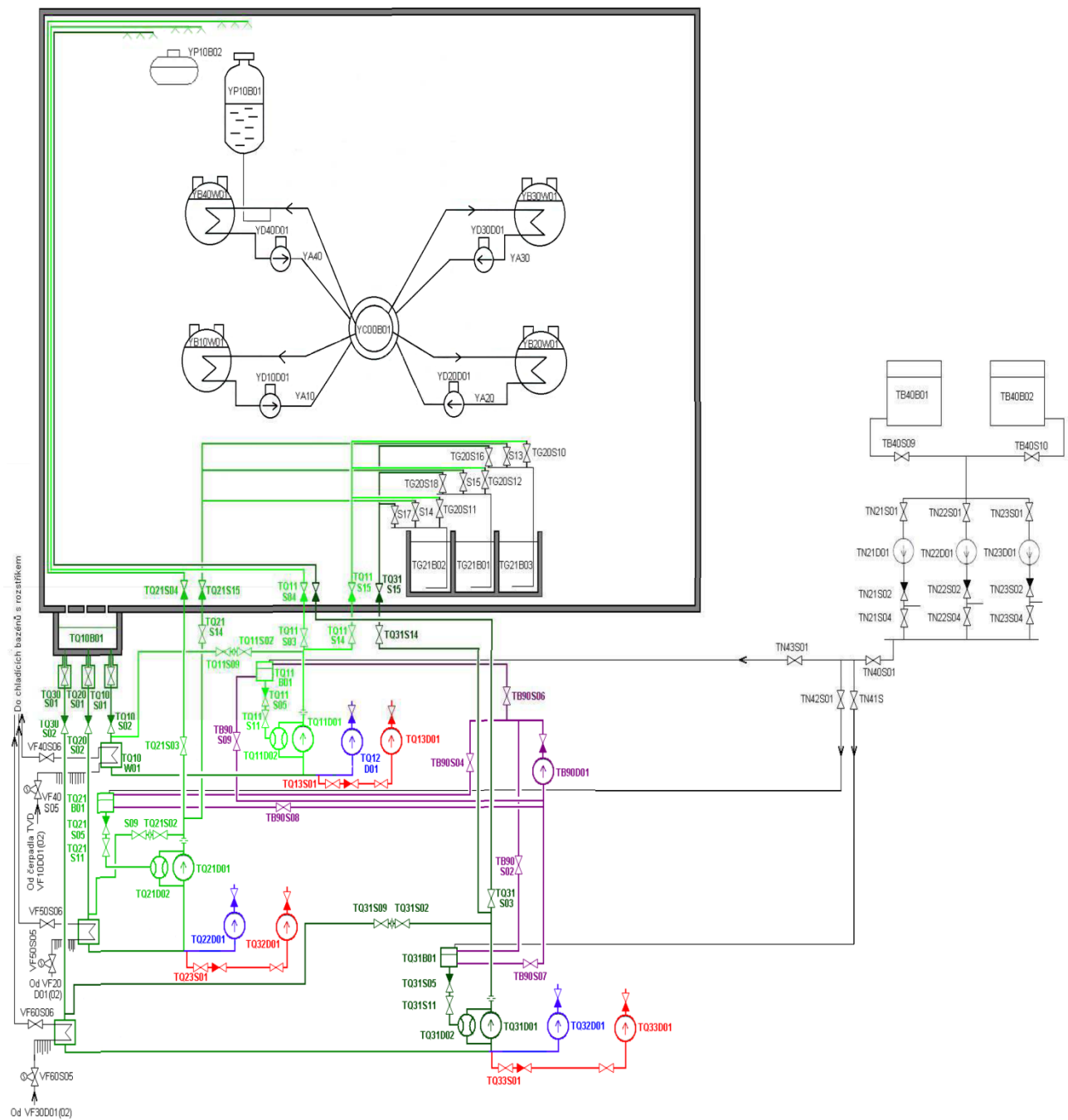
Systém zajišťuje ohřev havarijní nádrže na teplotu 60 [°C], aby v případě zásahu havarijních systému nedošlo k teplotnímu šoku tělesa tlakové nádoby reaktoru, způsobeného dávkou studené vody na horkou stěnu tlakové nádoby. V případě vzniku signálu "havárie" se systém ohřevu automaticky odstavuje. [8]



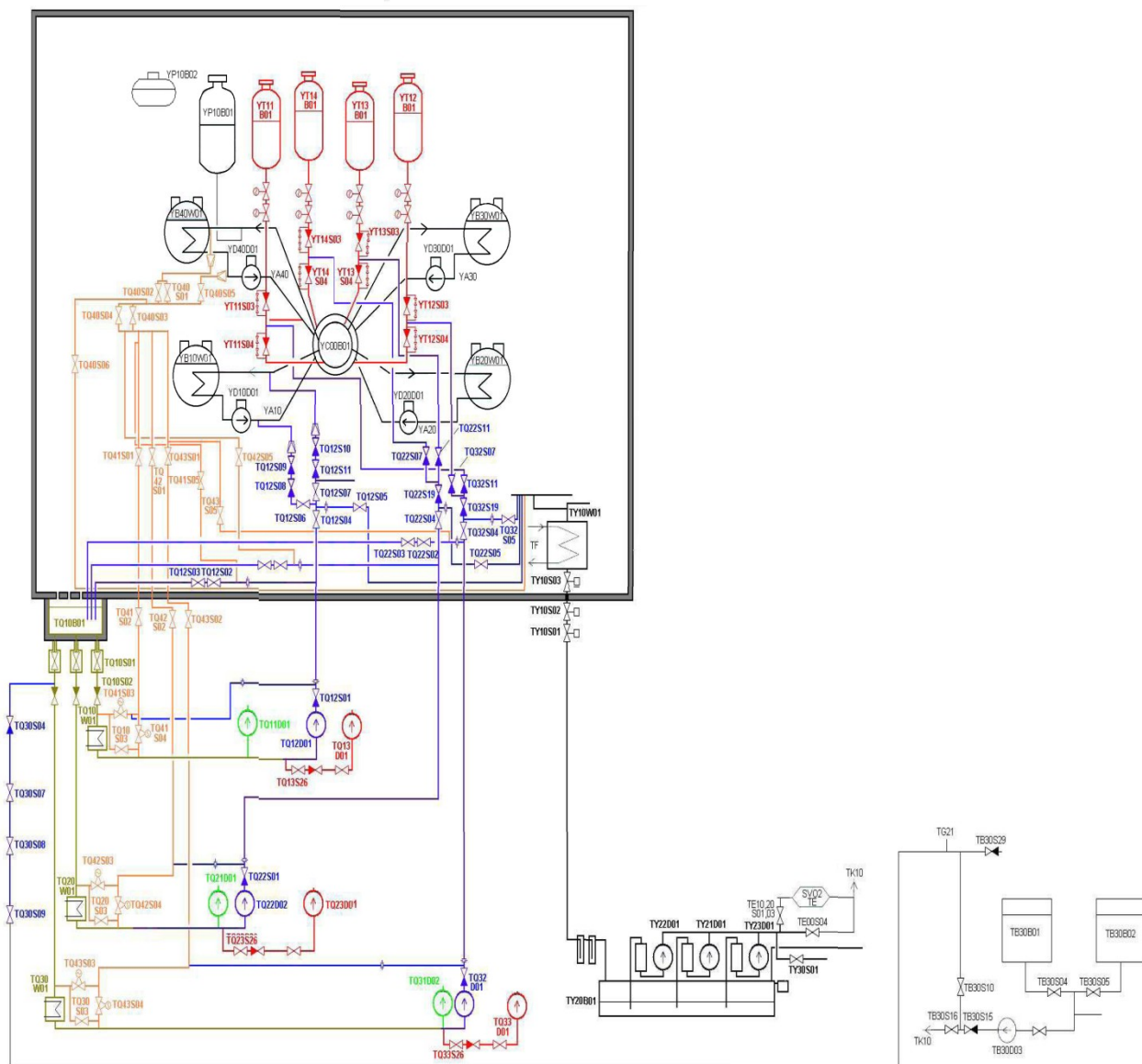
Obr. 3.1 Schéma havarijního systému MIR 1200 [8]



Obr. 3.2 Principální schéma havarijních systémů [8]



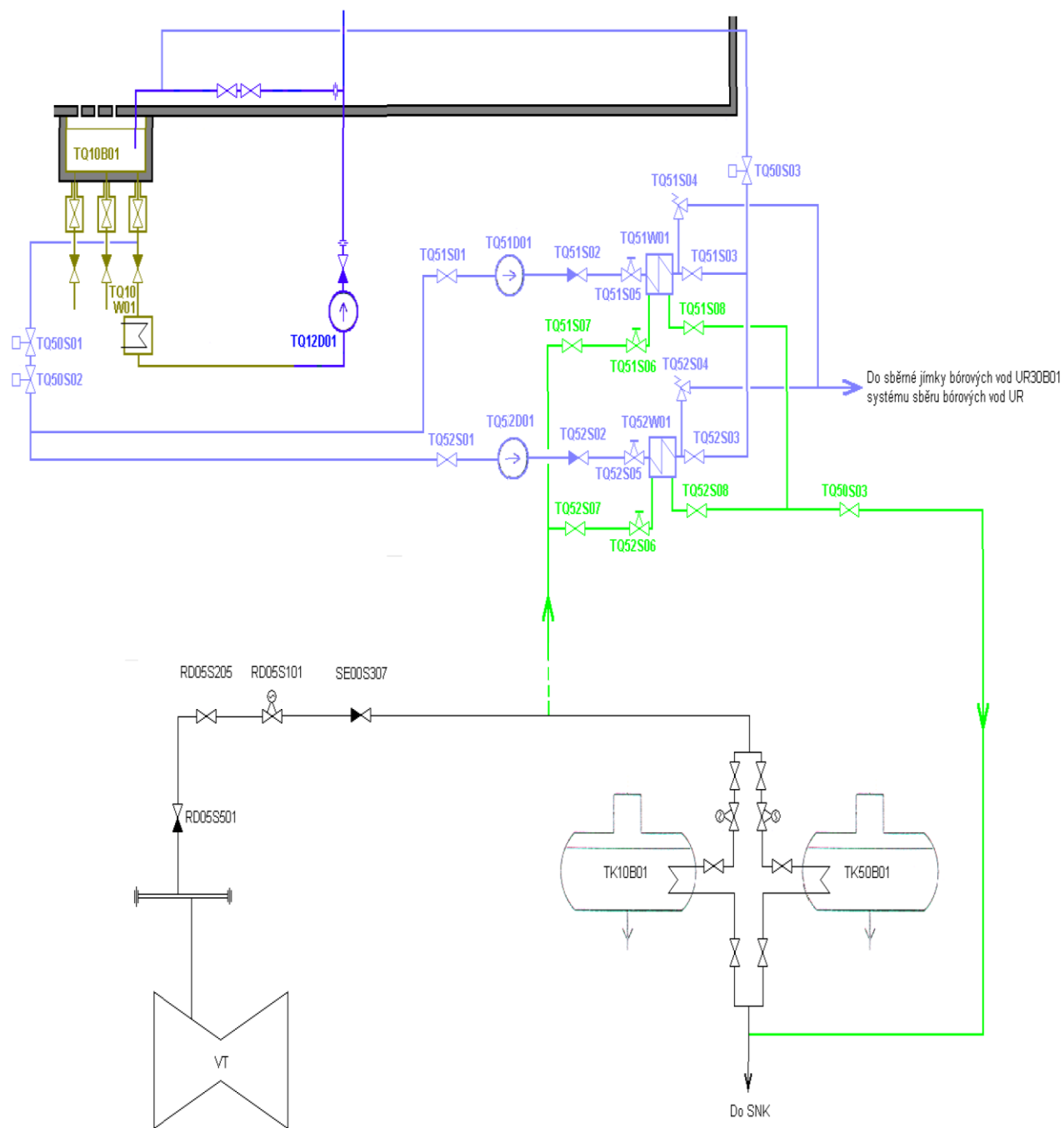
Obr. 3.3 Principální schéma sprchového systému a jeho návaznosti [8]



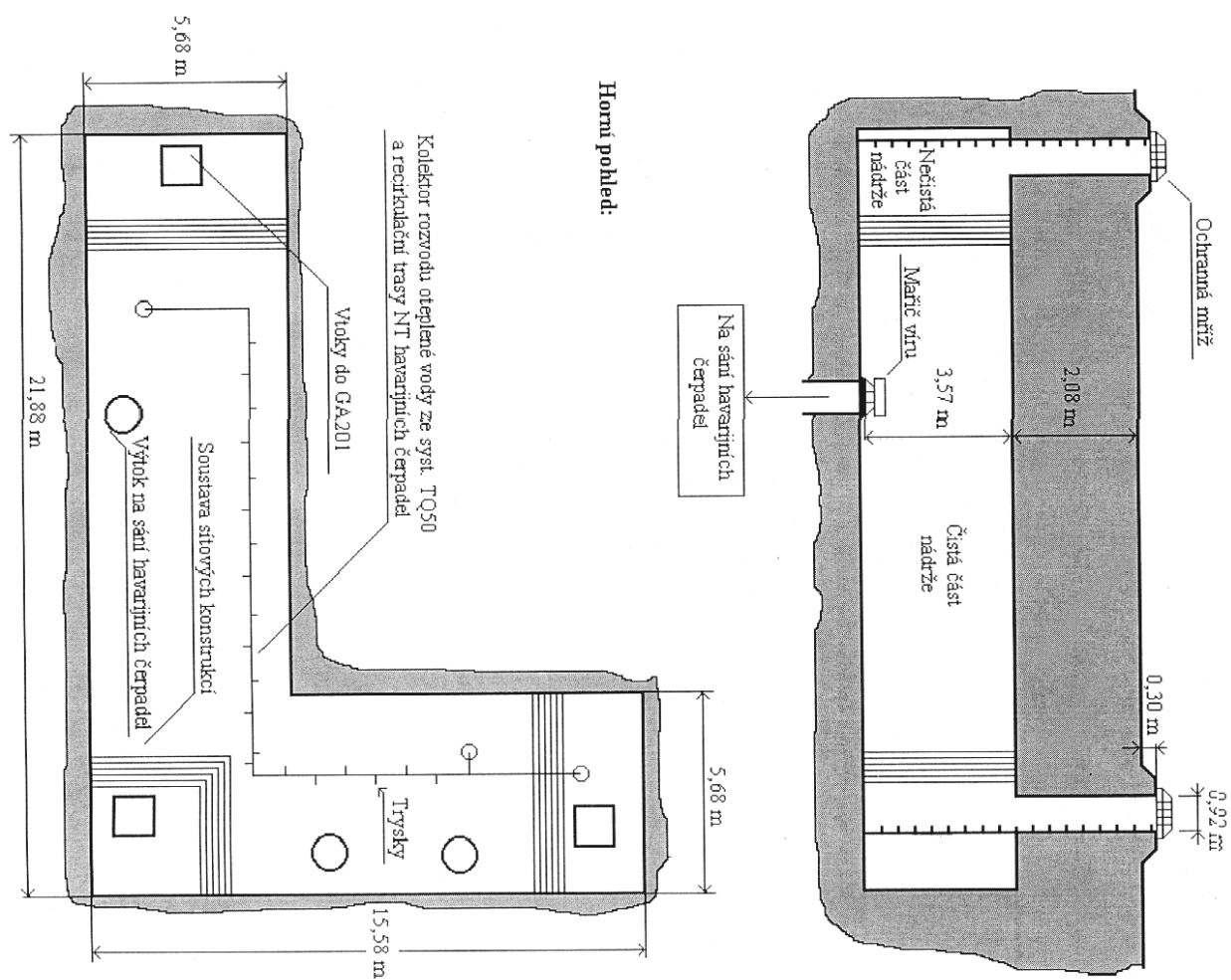
Obr. 3.4 Principální schéma návaznosti nízkotlakého systému havarijního a normálního dochlazování [8]



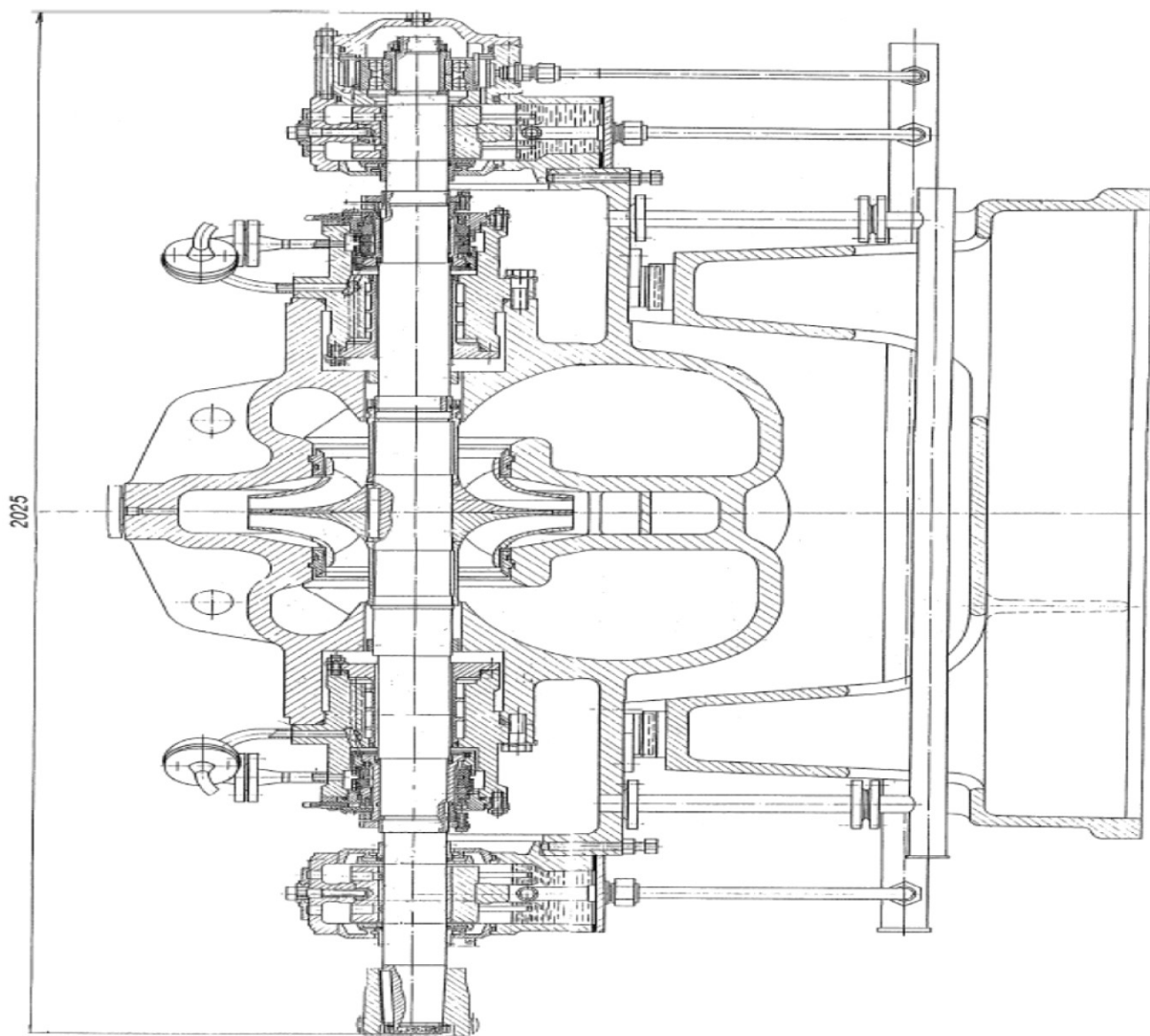




Obr. 3.6 Principální schéma systému ohřevu nádrže [8]



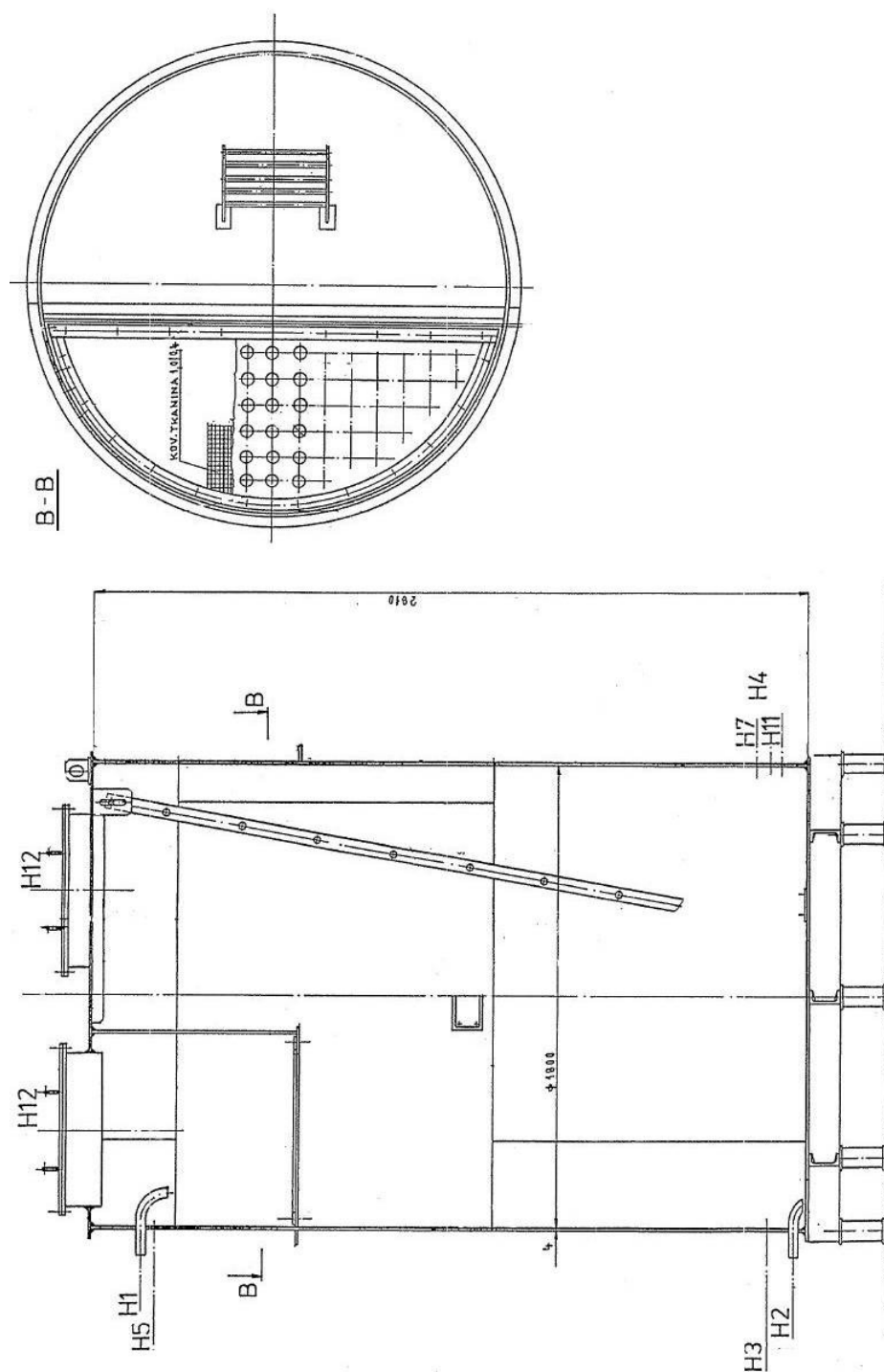
Obr. 3.7 Schéma nádrže havarijní zásoby kyseliny borité [8]



*Průměr oběžného kola pro čerpadlo 1TQ11,21,31D01 je 330 mm.*

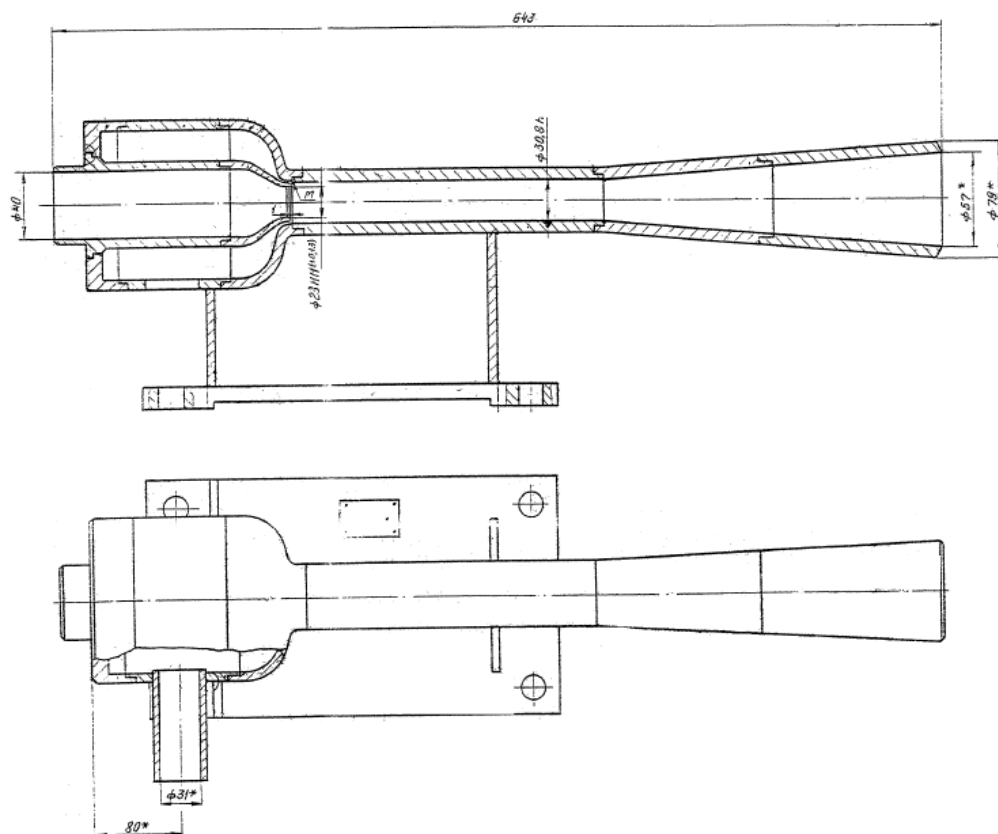
*Průměr oběžného kola pro čerpadlo 2TQ12,22,32D01 je 410 mm.*

*Obr. 3.8 Sprchové čerpadlo 1TQ11,21,31D01 a čerpadlo havarijního normálního dochlazování 1TQ12,22,32D01 [8]*

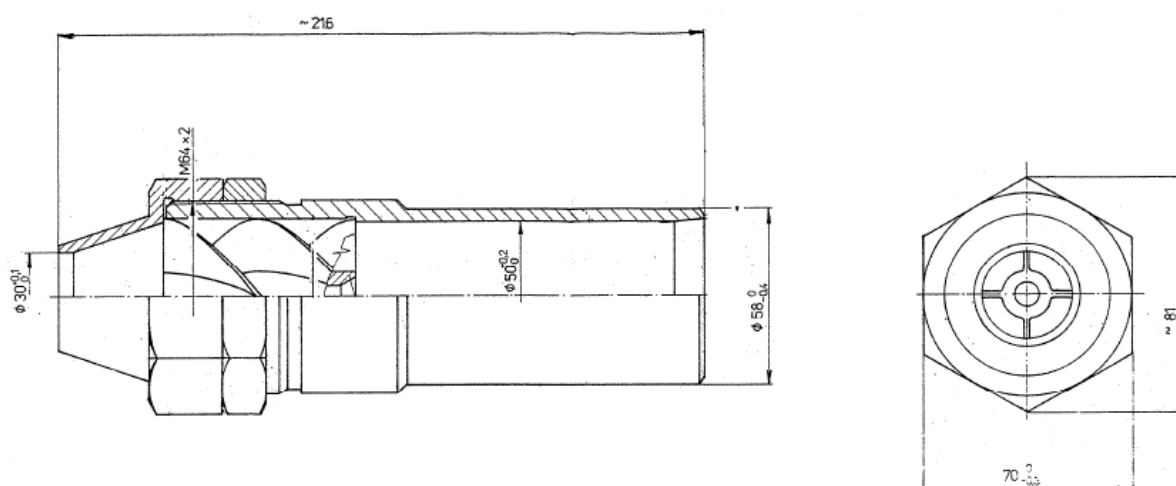


- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| H1- vstup roztoku                          | H6- přívod čistého kondenzátu |
| H2- vypouštění                             | H7- měření teploty            |
| H3- výstup roztoku na ejektor              | H11- měření hladiny           |
| H4- výstup roztoku do speciální kanalizace | H12- průlez                   |
| H5- případ do speciální kanalizace         |                               |

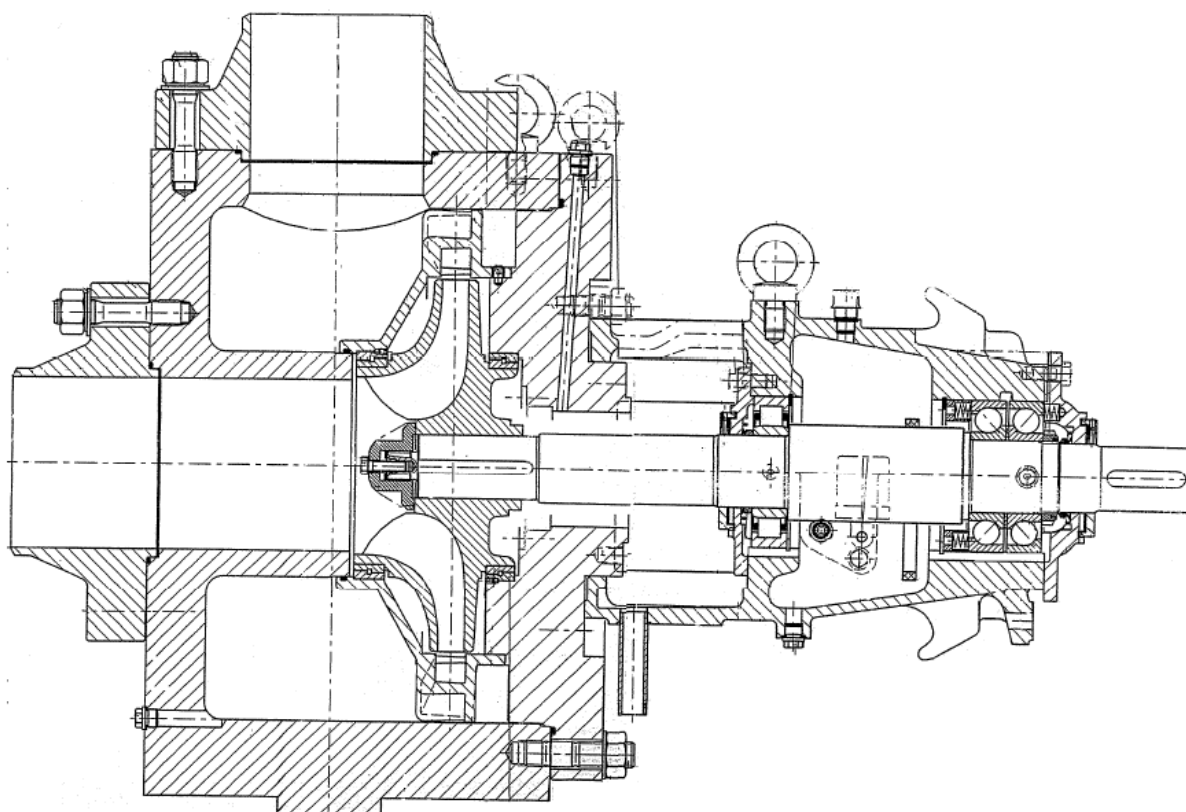
Obr. 3.9 Nádrž roztoku boritanu draselného TQ11(21,31)B01 [8]



Obr. 2.10 Ejektor (vodoproudé čerpadlo) TQ11,21,31D02 [8]

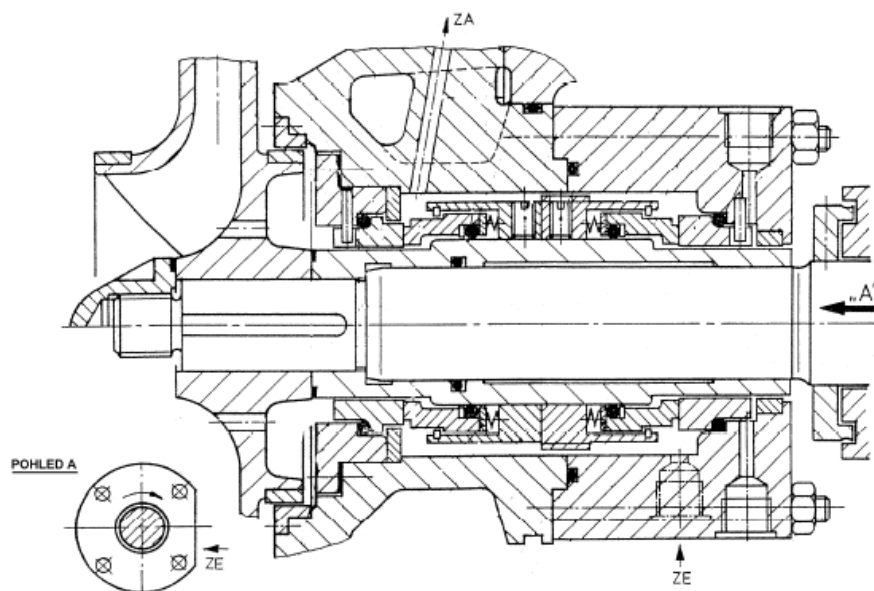


Obr. 3.11 Sprchovací tryska [8]



Obr. 3.12 Čerpadlo havarijního a normálního dochlazování 2TQ12,22,32D01 a sprchové

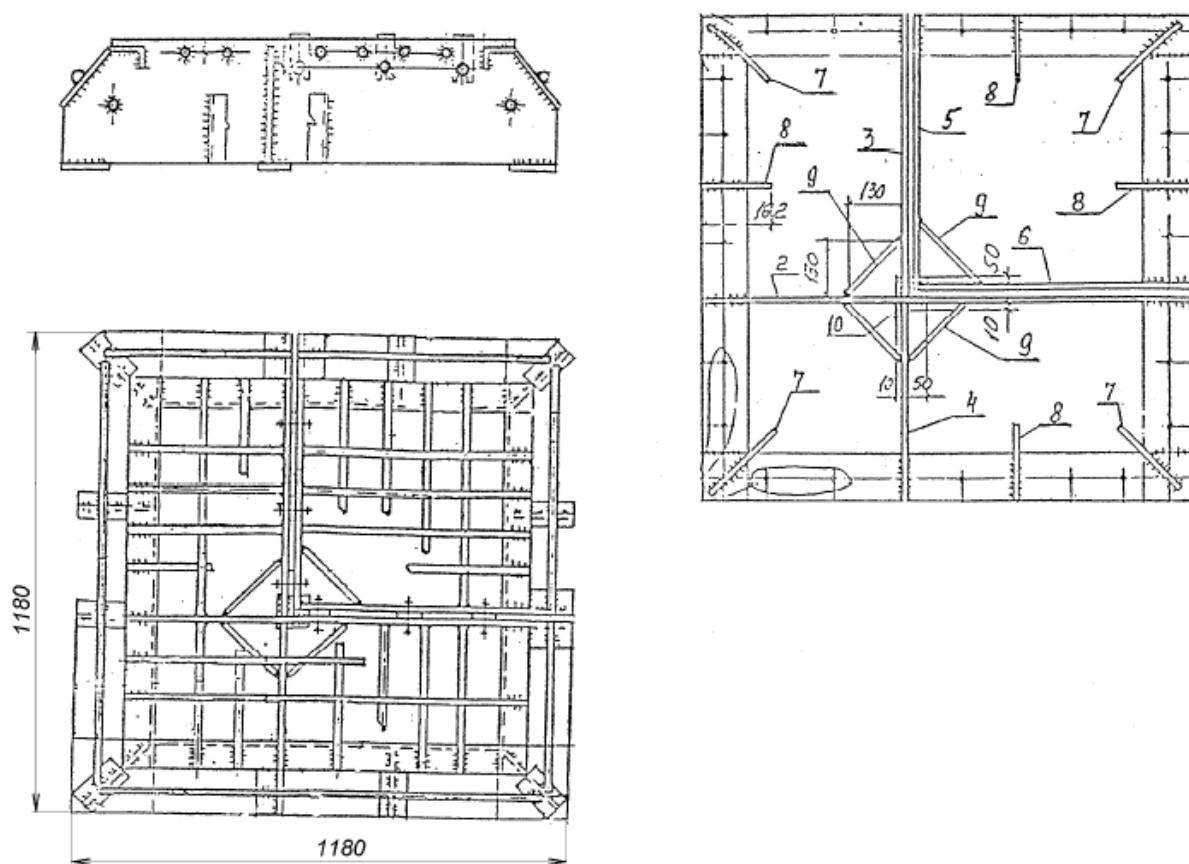
čerpadlo 2TQ11,21,31D01 [8]



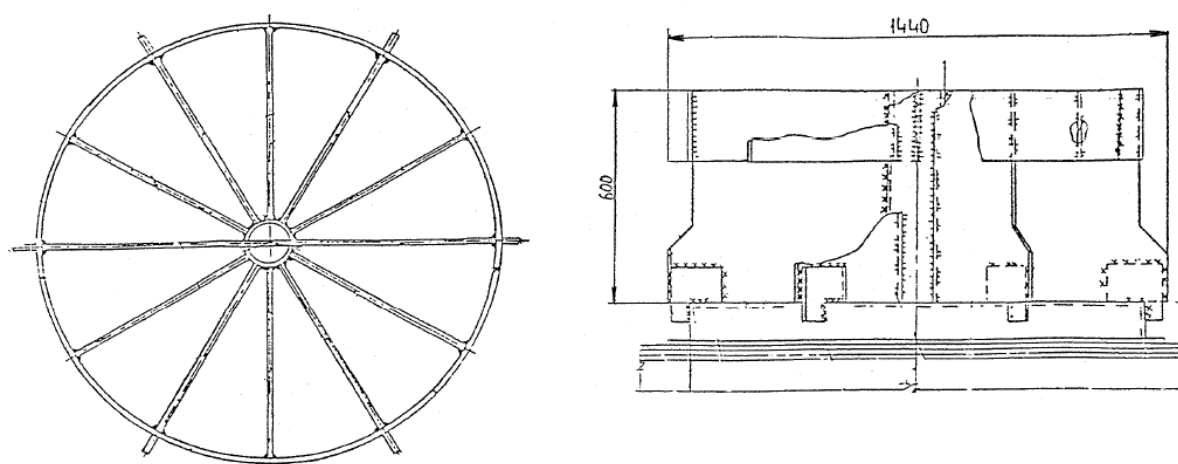
ZE – přívod blokovací kapaliny z termosifonu

ZA – odvod blokovací kapaliny z termosifonu

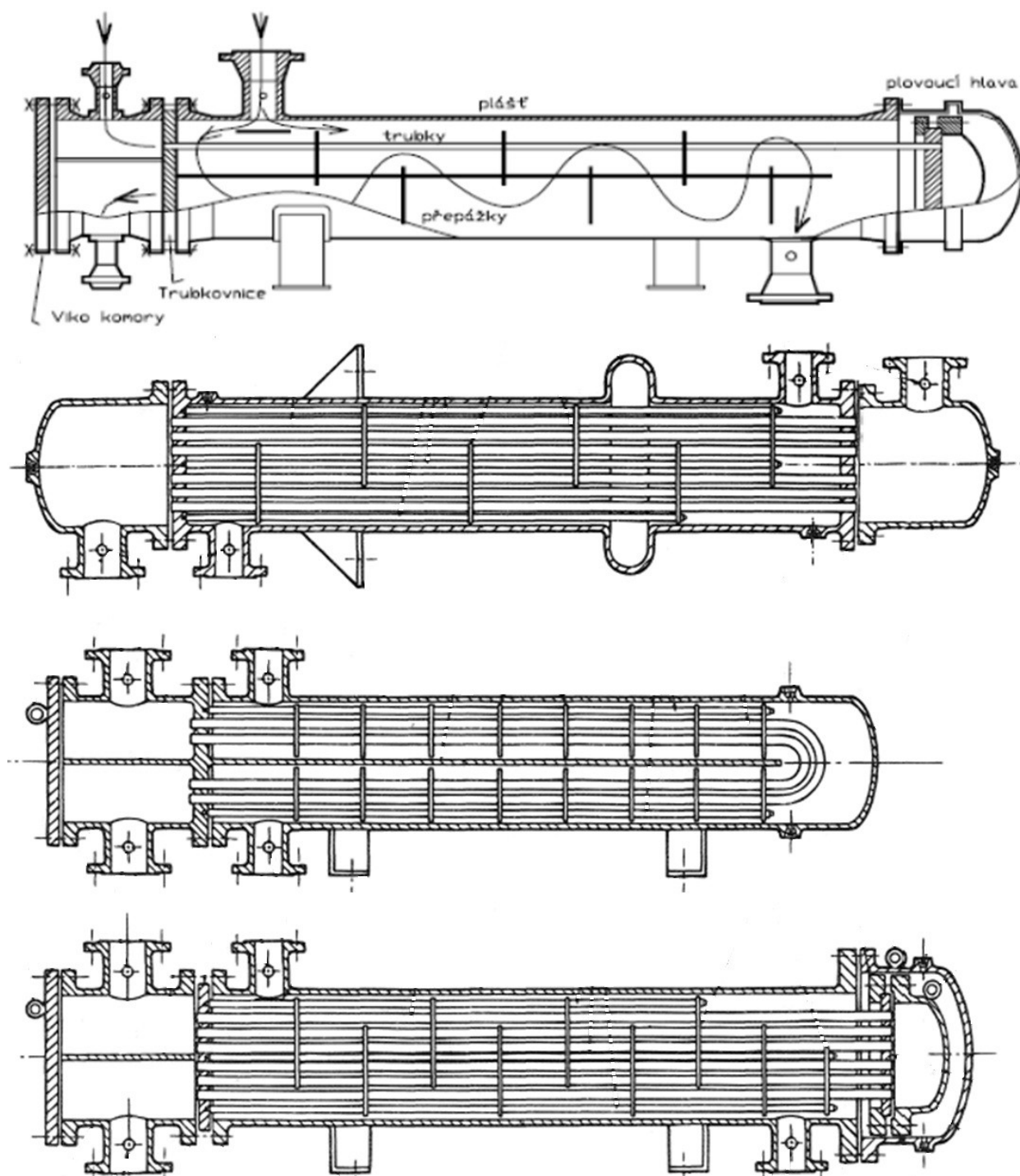
Obr. 3.13 Dvojitá mechanická ucpávka čerpadel 2TQ11,21,31D01 a 2TQ12,22,32D01 [8]



Obr. 3.14 Vtokový objekt do nádrže havarijní zásoby kyseliny borité TQ10B01 [8]

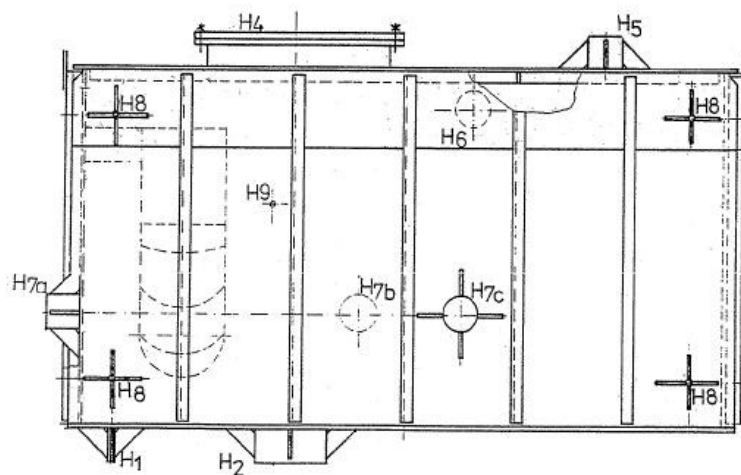
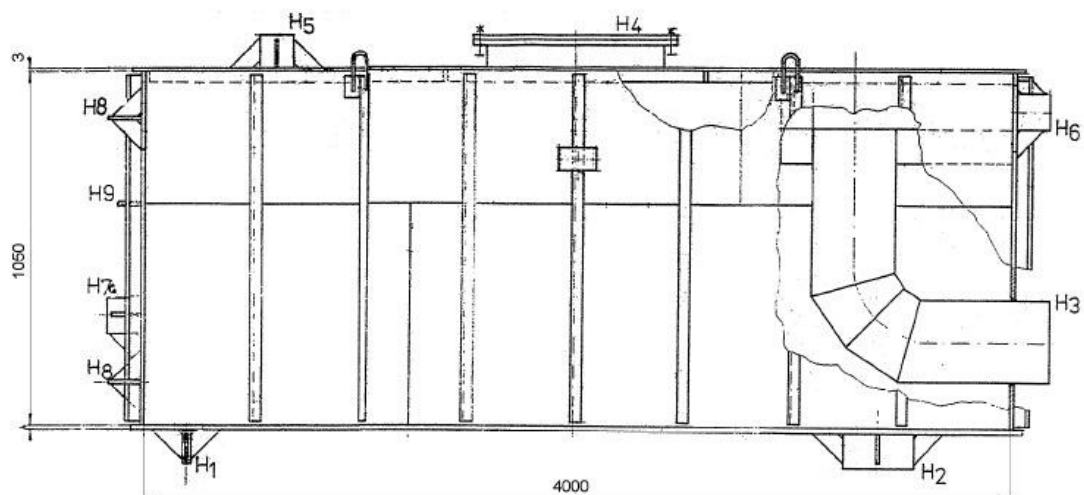


Obr. 3.15 Mařič víru v nádrži havarijní zásoby kyseliny borité TQ10B01 [8]



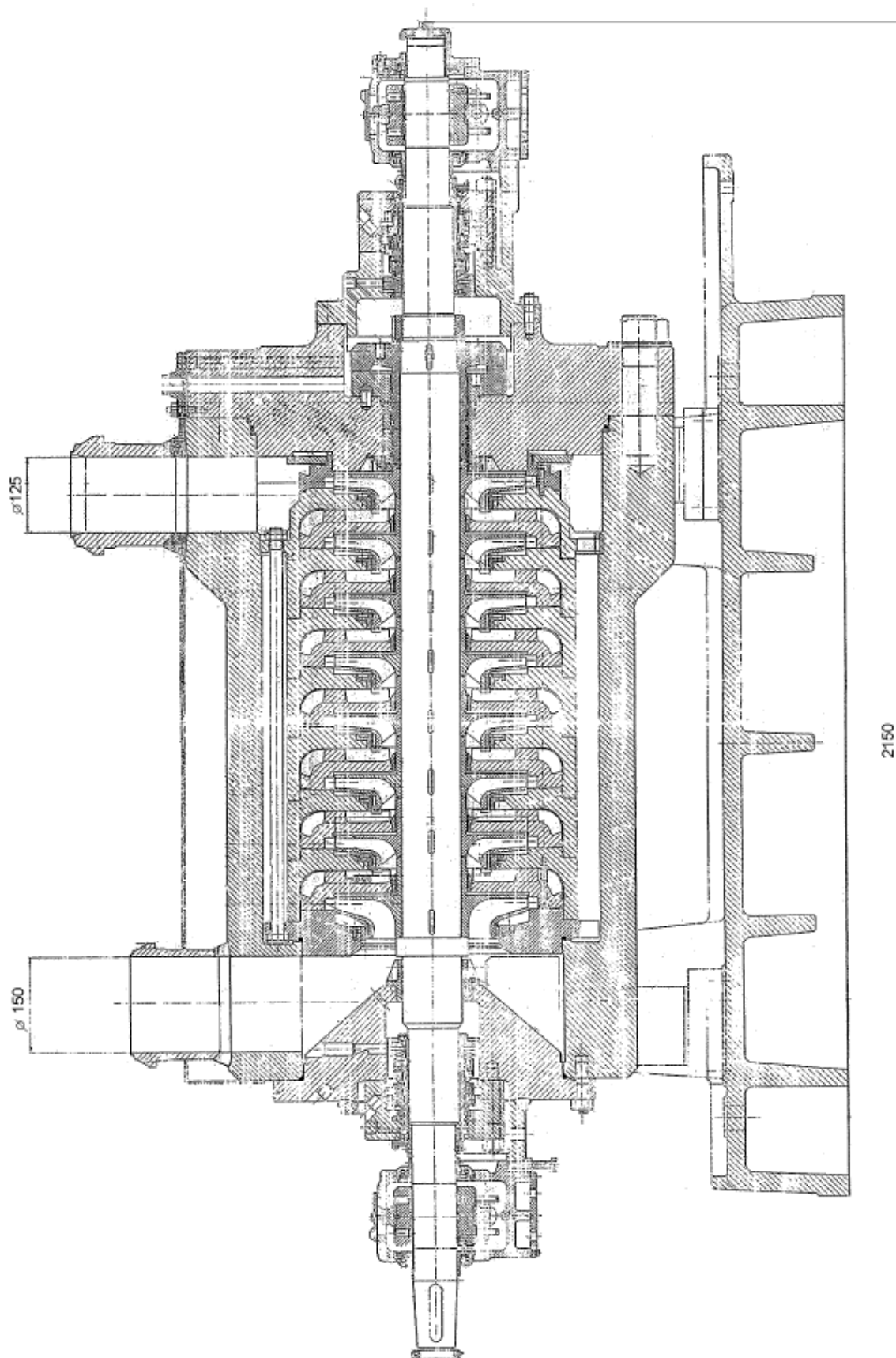
Obr. 3.16 Různé druhy havarijních výměníků, které lze použít v projektu MIR 1200 [8]



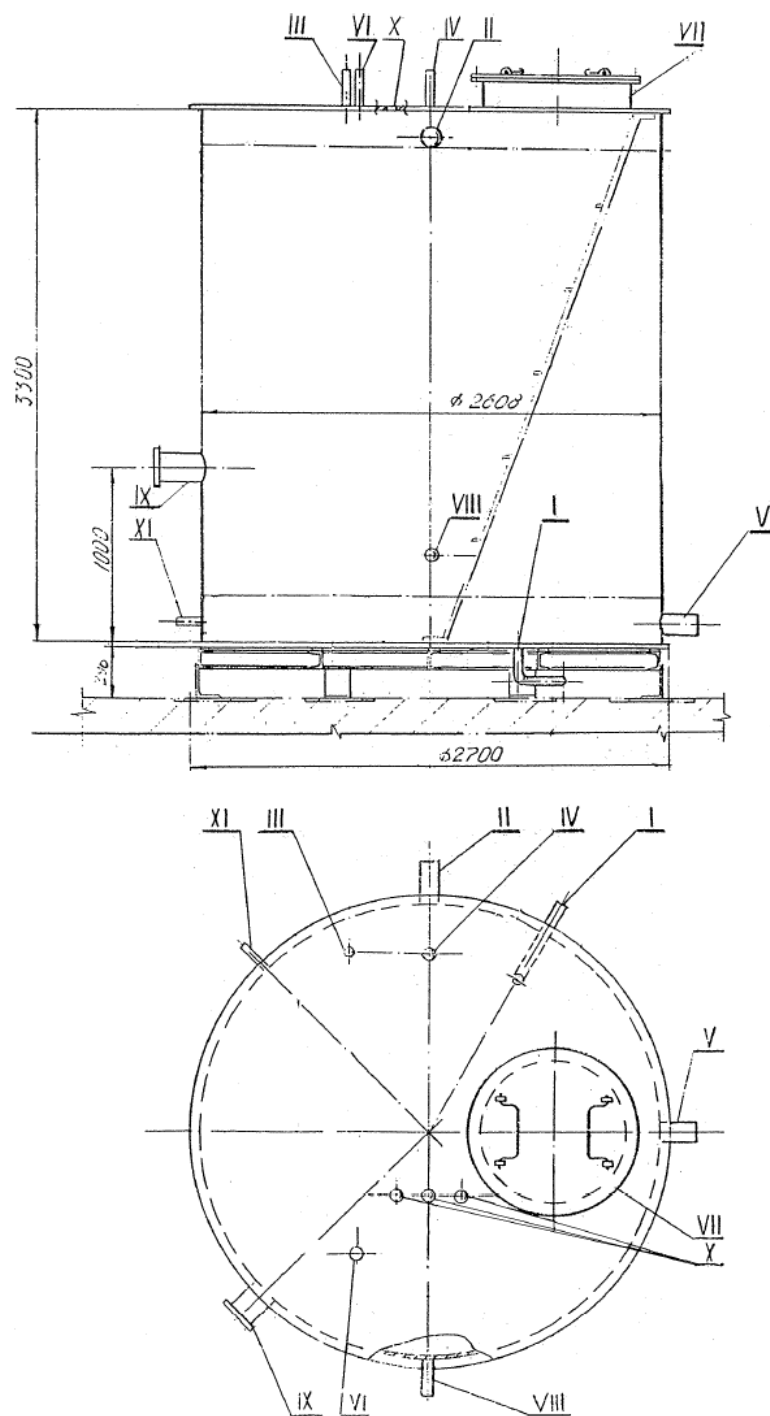


- |                                 |                                |
|---------------------------------|--------------------------------|
| H1- vypouštění<br>přívod k sání | H6- přívod do nádrže           |
| H2- čerpadla                    | H7- přívod k bórmetru          |
| H3- přepad                      | H8- měření hladiny             |
| H4- průlez                      | H9- návarek pro měření teploty |
| H5- odvzdušnění                 |                                |

Obr. 3.17 Nádrž roztoku kyseliny borité [8]

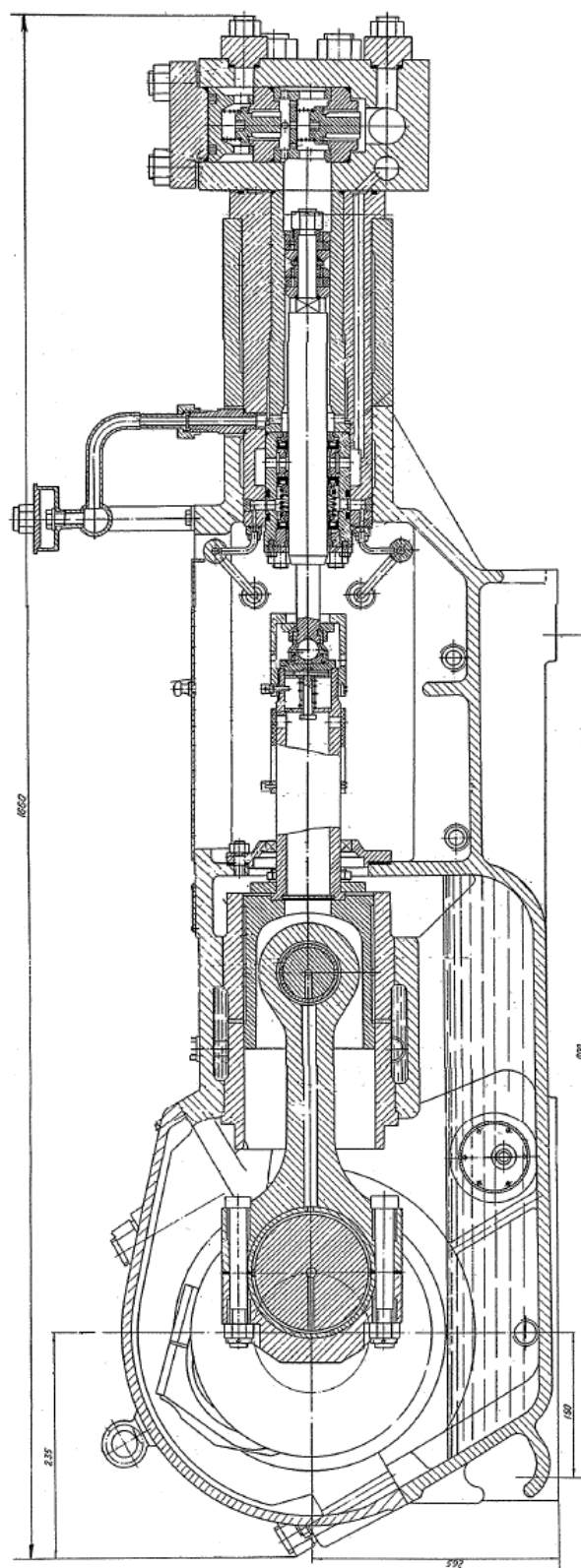


Obr. 3.18 Vysokotlaké čerpadlo havarijního doplňování TQ13,23.33D01 [8]

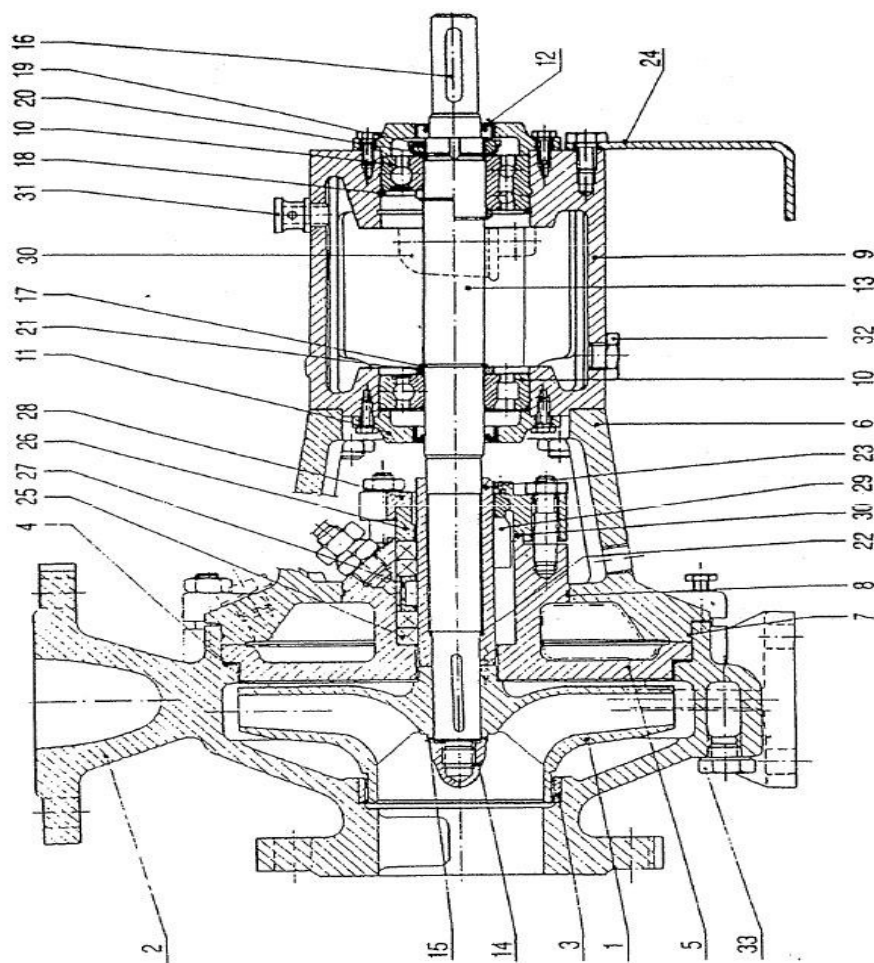


- |     |                                    |      |                            |
|-----|------------------------------------|------|----------------------------|
| I   | vypouštění do systému OTB          | VI   | odvzdušnění                |
| II  | přepad do systému UR               | VII  | průlez                     |
| III | recirkulace čerpadla TQ14,24,34D01 | VIII | jímka pro teploměr         |
| IV  | plnění                             | IX   | hrdlo bóroměru (nevyužito) |
| V   | přívod na sání čerpadla TQ14,24,34 | X    | hladiny                    |
|     |                                    | XI   | hrdlo pro hladinoměr       |

Obr. 3.19 Nádrž roztoku kyseliny borité TQ14,24,34B01 [8]



Obr. 3.20 Vysokotlaké čerpadlo havarijního vstřikování TQ14,24,34D01 [8]



- |                          |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. oběžné kolo           | 18. pojistný kroužek    |
| 2. spirála               | 19. matice KM           |
| 3. těsnící kruh          | 20. matice MB           |
| 4. těsnění ploché        | 21. opěrný kroužek      |
| 5. víko čerpadla         | 22. těsnění hřídele     |
| 6. lucerna               | 23. pouzdro ucpávky     |
| 7. těsnící kroužek       | 24. patky konzoly       |
| 8. těsnící kroužek       | 25. provazcové těsnění  |
| 9. ložisková konzola     | 26. ucpávkový kroužek   |
| 10. ložisko              | 27. zahlcovací kroužek  |
| 11. víko ložiska         | 28. ucpávková příruba   |
| 12. gufero               | 29. mechanická ucpávka  |
| 13. hřídel               | 30. doplňovač oleje     |
| 14. matice oběžného kola | 31. zátka odvzdušňovací |
| 15. pojistná podložka    | 32. zátka vypouštěcí    |
| 16. pera                 | 33. zátka odvodňovací   |
| 17. pojistný kroužek     |                         |

Obr. 3.21 Čerpadlo k míchání nádrží roztoku boritanu draselného TB90D01 [8]

## 4. Další bezpečnostní systémy MIR1200

- Zvýšení elektrického výkonu
- Zvýšení tepelného výkonu
- Zvýšení tlaku páry na výstupu z generátoru
- Zmenšení tlakových ztrát v hlavním parovodu na 0,2 [MPa]
- Konstrukce kontejmentu
- Bezpečnostní systémy
- Programovatelný digitální systém kontroly a řízení
- Účinnost JE
- Doba výstavby JE (54 měsíců)
- Životnost JE (60 let)
- Bezpečnostní systémy

Evoluční změnou oproti VVER 1000 konstrukce kontejmentu. Kontejment je dvouplášťový, přičemž vnější plášť je ze železobetonu a je projektován proti vnějším přírodním či lidským vlivům. Kontejment je projektován proti letecké nehodě (kontejment snese pád letadla o váze 5,7 [t], které se řítí rychlostí 100 [m/s]), externímu výbuchu (kontejment snese tlakovou vlnu o rázu 30 [kPa] po dobu 1 [s]), zatížení sněhem a ledem (tlak 4,9k [Pa]), zatížení větrem (rychlost větru 30 [m/s] ve výšce 10 [m], odolnost proti vichru třídy F3 dle stupnice Fujita) a zemětřesení (referenční zrychlení základové půdy 0,25 [g]). Vnitřní betonový předpjatý plášť kontejmentu je konstruován na tlak 0,5 [MPa] a teplotu 150 [°C] a je vybaven ocelovou vystýlkou. Zde je patrný rozdíl oproti AP1000, kdy vnitřní plášť je celý z oceli. Jak již bylo řečeno primární okruh je principiálně řešen obdobně jako VVER 1000, ovšem v důsledku zvyšování parametrů došlo ke změně rozměrů komponent primárního okruhu. Tyto změny se týkají především tlakových nádob, čerpadel, armatur aj. V porovnání s VVER 1000 se rozměry zvětšily. Konstrukční řešení JE s reaktorem MIR-1200 vychází rovněž z provozních zkušeností, přičemž využívá nejnovějších technologií. Díky takovému postupu je dosaženo většího výkonu, vyšší bezpečnosti, delší životnosti aj. [9], [10], [11], [12]

### 4.1 Základní bezpečnostní systémy MIR-1200

**Bezpečnost projektu MIR-1200 je založena na následujících bodech:**

- Princip ochrany do hloubky
- Zahrnutí požadavků mezinárodních agentur (IAEA, EUR)
- Zkušenosti z dosud provozovaných reaktorů
- Zahrnutí pravděpodobnostních a deterministických analýz
- Výsledky podpořené výzkumnou činností

**Bezpečnost projektu MIR-1200 je charakterizována především těmito systémy:**

- Čtyři bezpečnostní trasy
- Dvojitý kontejment
- Zvýšená seismická odolnost

- Rekombinátoři vodíku, lapač roztavené aktivní zóny
- Pasivní systém odvodu zbytkového tepla z kontejmentu
- Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru
- Nezávislost na externích zdrojích energie po dobu 72 hodin

**Bezpečnostní systémy projektu MIR-1200 lze opět rozdělit na:**

- Aktivní bezpečnostní systémy
- Pasivní bezpečnostní systémy

**Mezi aktivní bezpečnostní systémy patří především:**

- Vysokotlaká čerpadla dávkování roztoku kyseliny borité do primárního okruhu
- Nízkotlaká čerpadla havarijního dochlazování
- Sprchový systém
- Vysokotlaké vstřikování kyseliny borité
- Havarijní napájení parogenerátorů
- Havarijní odvod paroplynové směsi z parogenerátorů
- Havarijní odvod paroplynové směsi z horní části jaderného reaktoru

**Mezi pasivní bezpečnostní systémy patří především:**

- Pasivní odvod tepla z kontejmentu
- Pasivní odvod tepla z parogenerátoru
- Lapač roztavené aktivní zóny
- Pasivní chlazení roztavené aktivní zóny
- Hydroakumulátory
- Pasivní likvidace vodíku v kontejmentu
- Systém regulačních tyčí v reaktoru
- Ochrana před přetlakováním primárního okruhu (pojišťovací armatury)

Projekt MIR-1200 na rozdíl od AP1000 využívá při řešení těžkých havárií aktivní i pasivní bezpečnostní systémy. Jak pasivní, tak aktivní bezpečnostní systémy jsou redundantní, přičemž redundance některých systémů je oproti VVER 1000 zvýšena z 3x100 [%] na 4x100 [%]. Některé systémy jsou redundantní pouze 4x50 [%].

**Příklady systémů, které jsou redundantní 4x100 [%]:**

- Havarijní systémy chlazení aktivní zóny, pasivní část
- Vysokotlaké systémy havarijního doplňování
- Nízkotlaké systémy havarijního chlazení aktivní zóny
- Odvod zbytkového tepla ze sekundárního okruhu

**Příklady systémů, které jsou redundantní 4x50 [%]:**

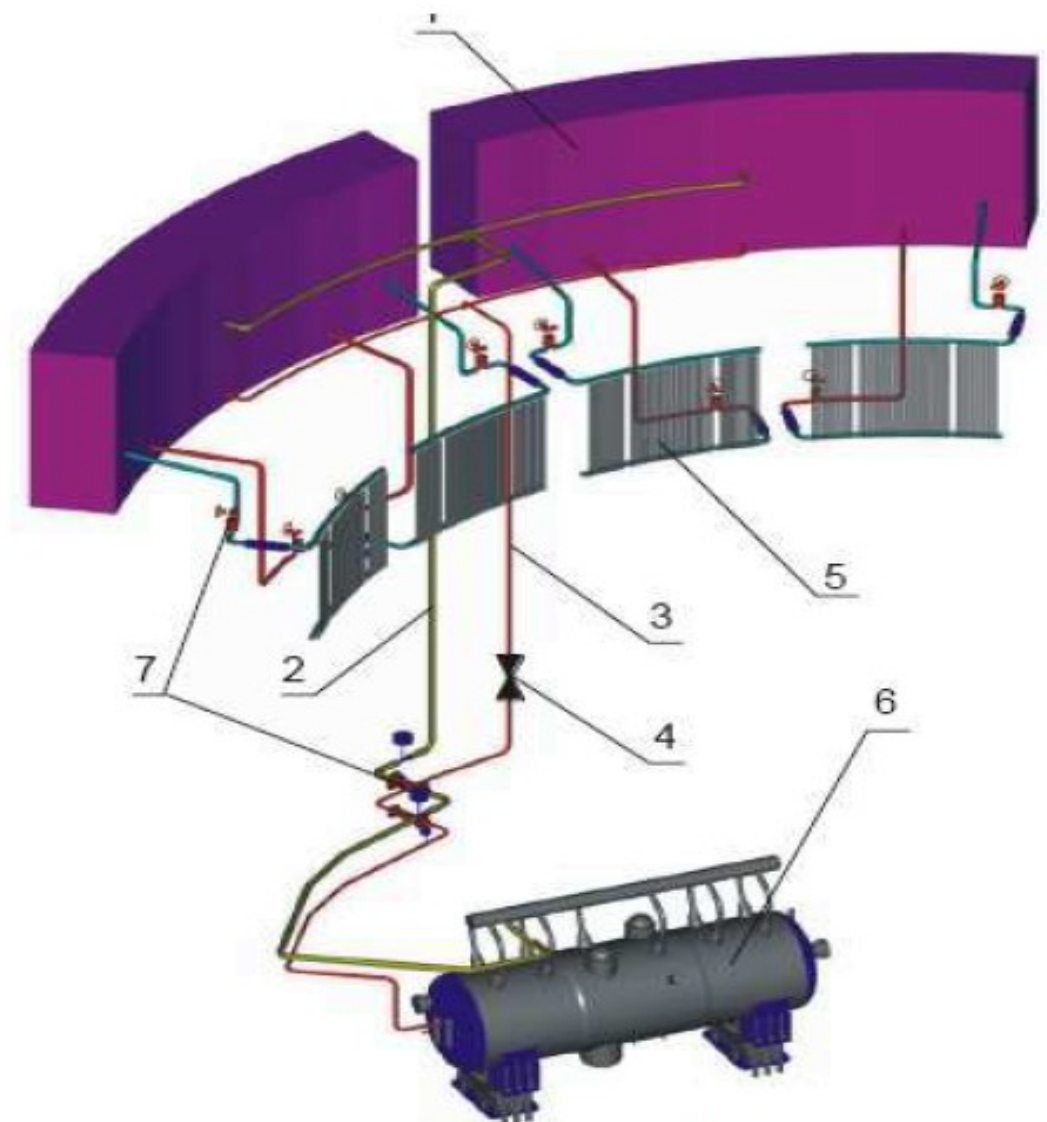
- Aktivní systém odvodu zbytkového tepla
- Aktivní systém havarijního doplňování bóru
- Sprchový systém

Jak již bylo zmíněno, aktivní bezpečnostní systémy jsou systémy závislé na externích zdrojích energie. Projekt MIR-1200 řeší tuto závislost pomocí diesel-generátorů, které jsou redundantní až 4x100 [%]. Tato redundance odpovídá zhruba 4x6 [MW]. Pro případ situace zvané station blackout, tedy pro případ, kdy je jaderná elektrárna naprosto bez zdroje elektrické energie, jsou přidány další nouzové diesel-generátory menších výkonů. Místo těchto generátorů je možno využít spalovacích turbin, u nichž je však přibližně 6x delší doba najetí. Rovněž u projektu existuje určitá závislost pasivních bezpečnostních systémů na aktivních bezpečnostních systémech. Např. ventily jsou poháněny elektromotory. Dále bude věnována pozornost bezpečnostním systémům, které jsou oproti projektům druhé generace inovativní.

## 4.2 Pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu

Pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu (viz. obr. 4.1) zajišťuje stabilní odvod tepla z kontejmentu za normálního provozu a v případě havárie typu LOCA a tavení aktivní zóny. Systém funguje i v případě selhání sprchového systému či výpadku elektrického napájení elektrárny. Systém pracuje na principu přirozené konvekce tepla. Teplý vzduch, který vznikne v kontejmentu, ohřívá vodu, která proudí přes tepelný výměník (voda – vzduch) umístěný v kontejmentu. Ohřátou vodu v kontejmentu tlačí studená voda směrem do tepelného výměníku, který je umístěn v akumulární nádrži (akumulační nádrž je umístěna mimo kontejment). Je uplatněn princip přirozené cirkulace a není třeba žádných čerpadel. V akumulární nádrži teplá voda předá teplo studené vodě. Teplo vzniklé v akumulární nádrži je odvedeno přes hydrostatický uzávěr. Akumulační nádrž je vybavena snímači hladiny a v případě potřeby doplněna přes čerpadlo. V případě vzniku havárie typu LOCA (malé či velké) roste tlak dramaticky během prvních čtyř hodin od prasknutí potrubí primárního okruhu. V případě selhání sprchového systému tlak roste téměř lineárně a po cca 22 hodinách dosáhne hodnoty cca 0,61 [MPa], což je hodnota přesahující projektový tlak kontejmentu (**případ 1**). Díky využití pasivního odvodu tepla z kontejmentu se v čase cca 11 hodin od prasknutí potrubí primárního okruhu tlak ustálí na hodnotě cca 0,35 [MPa] a v dalším průběhu je téměř konstantní. Tím pádem není překročen projektový tlak 0,4 [MPa] (**případ 2**). [9], [10], [11], [12]





- 1 – Akumulační nádrže s vodou
- 2 – Parní potrubí
- 3 – Potrubí vedoucí do parogenerátoru
- 4 – Ventil potrubí vedoucí do parogenerátoru
- 5 – Tepelné výměníky umístěné v kontejmentu
- 6 – Parogenerátor
- 7 – Uzavírací ventily

*Obr. 4.1 Pasivní systém MIR 1200 [9]*

### 4.3 Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru

Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru funguje podobným způsobem jako pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu. V případě selhání čerpadel doplňování napájecí vody do parogenerátorů či prasknutí potrubí primárního okruhu (LOCA) je aktivován systém pasivního odvodu tepla z parogenerátoru. Princip fungování pasivního odvodu tepla z parogenerátoru tkví v tom, že při výše uvedených selháních se parogenerátor celý zaplní vodou z akumulární nádrže (akumulační nádrž je umístěna mimo kontejment). Jakmile je parogenerátor zaplněn vodou, vzniká parovodní směs. Vzniklá parovodní směs je odváděna přes potrubí do výměníků tepla, které jsou umístěny v akumulární nádrži. Zde se voda ochladí a proudí zpět do parogenerátoru. Cyklus tepelný výměník – parogenerátor – tepelný chladič v primárním okruhu. Dále systém pasivního odvodu tepla z parogenerátorů umožňuje snižovat následky havárie, kdy dojde k úniku chladicího média z primárního okruhu do sekundárního okruhu. Tudíž chlazení parogenerátoru po zaplnění vodou z akumulárních nádrží je zajištěno vodou, která je ochlazena ve výměnících tepla. kruhu. [9], [10], [11], [12]

### 4.4 Lapač roztavené aktivní zóny

V případě havárie s tavením aktivní zóny teče po protavení reaktorové nádoby tavenina směrem k lapači roztavené aktivní zóny. Lapač roztavené aktivní zóny je zařízení, které slouží k zachycení roztavené aktivní zóny. Zařízení dále zajišťuje menší tvorbu plyných produktů tvořících se z roztavené aktivní zóny a chlazení taveniny. Díky těmto funkcím se snižuje tepelné a tlakové namáhání vnitřního kontejmentu. Tavenina je navíc ještě chlazena bórovou vodou skrze sprchové systémy. Voda proudí do sprchových systémů gravitačně z kontrolních šachet reaktoru. Lapač roztavené aktivní zóny je v podstatě dutina vybetonovaná z betonu. V této dutině je umístěn tepelný výměník, který zajišťuje chlazení roztavené aktivní zóny. Tepelný výměník je potrubím spojen se zásobními šachtami s vodou a chladicí médium chladí roztavenou aktivní zónu ve spodní části vnitřního koše a po jeho stranách. Vnitřní koš výměníku tepla je vyplněn speciální sloučeninou ocelové struktury, která je na bázi oxidu hlinitého a železitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). [9], [10], [11], [12]

### 4.5 Systém kontroly vodíku v kontejmentu

V kontejmentu jsou umístěny systémy pro kontrolu tvorby vodíku v kontejmentu a systémy na jeho likvidaci v případě havárie (nadměrná tvorba vodíku v reaktorové nádobě byla jednou z příčin nehody jaderné elektrárny Three Mile Island). Vodík vzniká především radiolýzou vody a korozi. Kontejment je vybaven rekombinačními zařízeními pro udržení přípustné koncentrace vodíku, aby nedošlo k výbuchu. Rekombinační zařízení pracují na principu zpětné reakce, kdy se vodík sloučí s kyslíkem za vzniku vody, která následně stéká po stěnách kontejmentu. V projektu MIR-1200 (podobné rekombinátory lze nalézt u projektů AP1000 a EPR) jsou použity katalytické rekombinátory. Na rozdíl od tepelných rekombinátorů, které fungují při teplotách kolem 600 – 700 [°C], katalytické rekombinátory umožňují rekombinaci vodíku na vodu již při teplotách okolo 0 [°C]. Katalyzátorem je zde nejčastěji platina a paladium. Katalytické rekombinátory jsou schopny pracovat již při koncentracích vodíku okolo 1 [%] a jsou schopny pracovat ve velkém rozsahu teplot a vlhkostí. Riziko

spojené s těmito rekombinátoři tkví v tom, že teplo uvolněné při rekombinaci může vést k zapálení vodíku. Toto riziko bylo výzkumem posouzeno jako zanedbatelné. [13]

## **4.6 Těžké havárie**

Projekt MIR-1200 definuje jako nejtěžší havárie následující dva typy havárií:

- Havárie typu tavení aktivní zóny (těžká havárie)
- Havárie typu LOCA (projektová havárie)

### **Havárie typu tavení aktivní zóny**

Havárie typu tavení aktivní zóny je v projektu MIR-1200 řešeno pomocí inovativního prvku – lapače roztavené aktivní zóny. Lapač aktivní zóny je schopen efektivně dochladiť roztavenou aktivní zónu pomocí tepelného výměníku. Voda, která proudí do tepelného výměníku, obsahuje kyselinu boritou o nízké koncentraci a proudí z nádrže umístěné u tepelného výměníku. Tento roztok je pak chlazen přes tepelný výměník. Nádrž slouží také k dávkování roztoku do primárního okruhu. Plynné produkty, které vzniknou při tavení aktivní zóny, jsou zachyceny v kontejmentu a jsou intenzivně sprchovány sprchovacími systémy. Zároveň je roztavená aktivní zóna chlazena bórovou vodou z kontrolní šachty reaktoru. [9], [10], [11], [12]

### **Havárie typu LOCA**

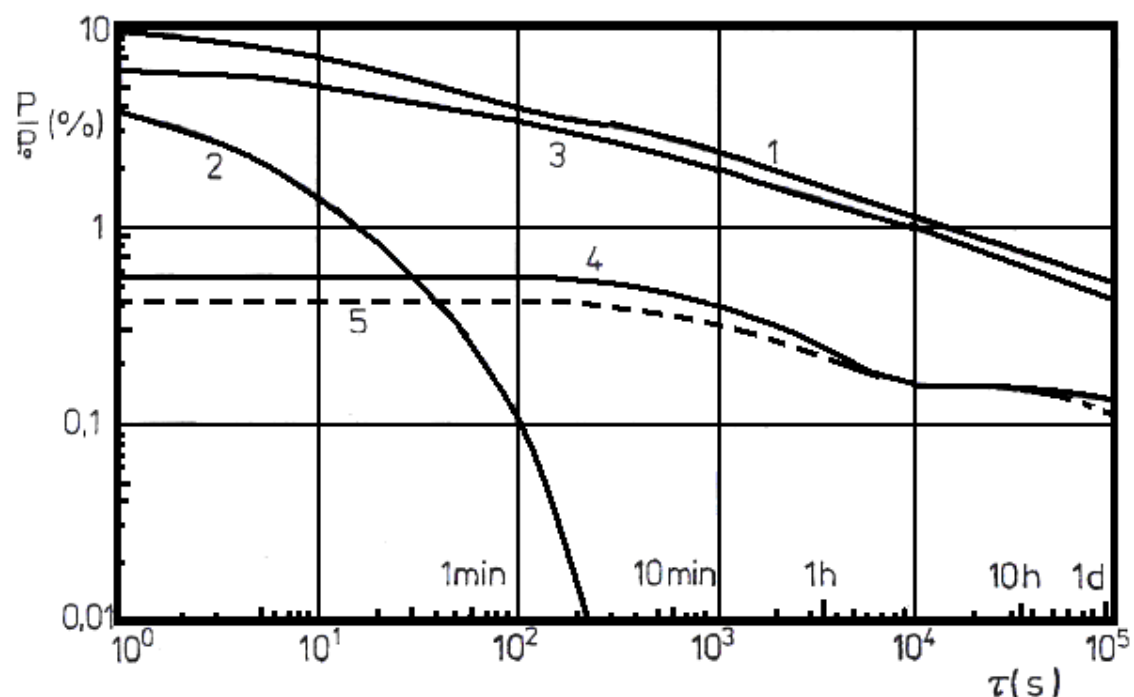
Projekt MIR-1200 řeší havárii typu LOCA podobně, jako by byla řešena v případě jaderné elektrárny Temelín. Nejdříve funguje systém normálního doplňování a zásoba vody v kompenzátoru objemu. Jakmile je systém normálního doplňování nedostačující, spustí se vysokotlaké systémy doplňování, pak hydroakumulátory a následně systémy nízkotlakého doplňování. Kompenzátor objemu je opatřen odlehčovacími a pojistnými armaturami, které slouží k odtakování systému, aby mohlo být uvedeno v činnost toto nízkotlaké doplňování. Zároveň slouží tyto armatury jako ochrana před vznikem přetlaku. Současně funguje sprchový systém a teplo je následně předáváno vloženému okruhu chlazení. Jiná možnost odvodu tepla z primárního okruhu je řízené odpouštění a doplňování (tzv. feed and bleed), tj. skrze prasklinu uniká chladivo. Chladivo je následně doplňováno takovým tempem, aby byl zajištěn odvod tepla a také odtakování v rámci limitů. V případě LOCA je rovněž možné odvádět teplo přes sekundární okruh (pokud není např. prasklá trubička v parogenerátoru). V případě, že se nedá odvádět teplo přes sekundární okruh a přes systém technické vody důležité, teprve potom jsou uvedeny v činnost pasivní systémy odvodu tepla. Vznikající paroplynová směs v místě trhliny zvyšuje tlak v kontejmentu a podporuje tvorbu vodíku. Takové nebezpečné jevy jsou redukovány pomocí sprchového systému, který umožňuje kondenzaci paroplynové směsi, a rekombinátorů, které udržují koncentraci vodíku pod mezí výbušnosti. [9], [10], [11], [12]

## **5. Zbytkový vývin tepla po odstavení reaktoru**

V potencionálně nebezpečných situacích je nutné rychlé odstavení reaktoru. Na rozdíl od klasických energetických zařízení je maximální rychlost poklesu tepelného výkonu z různých příčin omezena. Obvykle používaný orgán rychlého odstavení reaktoru - absorpční tyče – se zasouvají do aktivní zóny konečnou rychlostí. Intenzita štěpné řetězové reakce klesá i při velké záporné reaktivitě exponenciálně a při relativně malé výkonové hladině se začíná uplatňovat teplo vznikající radioaktivním rozpadem produktů štěpení a radioaktivních izotopů. Tepelné zdroje, z nichž některé působí v energetickém reaktoru ještě dlouho po odstavení reaktoru, je možno rozdělit do několika skupin:

- dobíhající štěpná řetězová reakce,
- radioaktivní rozpad produktů štěpení
- radioaktivní rozpad izotopů vzniklých radiačním záchytem neutronů,
- radioaktivní rozpad aktivovaných materiálů aktivní zóny.

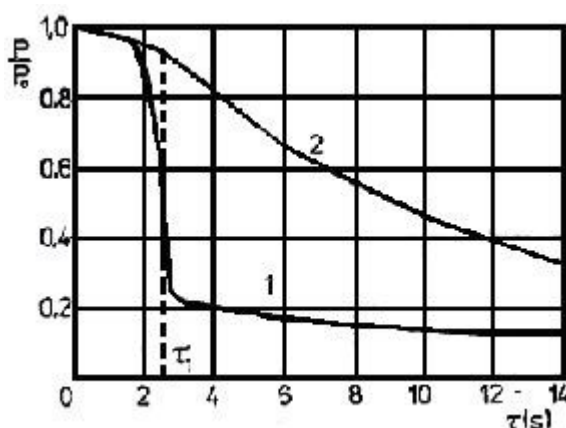
Zbytkový vývin tepla z dobíhající štěpné řetězové reakce lze přibližně chápat jako tepelný výkon vyvolaný náhlou skokovou změnou výkonu reaktoru s dlouhodobým odvodem tepla s exponenciálním charakterem typu (Obr. 5.1) .[14]



Obr.5.1. Zbytkový tepelný výkon reaktoru po odstavení. 1 – celkový výkon (3+2+4); 2 – výkon štěpné řetězové reakce; 3 – radioaktivní rozpad produktů štěpení; 4 – radioaktivní rozpad nuklidů; 5 -  $x_p = 0,8$  [14]

$$\frac{P(\tau)}{P_0} = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot \tau} \quad \text{kde } \tau - \text{probíhající čas od změny výkonu; } k_1, k_2 - \text{konstanty pro daný reaktor} \quad (5.1)$$

Zbytkový tepelný výkon odstaveného reaktoru uvolňovaný následkem radioaktivních rozpadů lze vypočítat z poloempirického vztahu typu (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Časový průběh výkonu po rychlém odstavení lehkovodního reaktoru (křivka 1) a tepelný výkon odvedený do chladiva (křivka 2) v reaktoru [14]

$$\frac{P(\tau)}{P_0} = A \cdot \tau^{-b} \quad \text{kdy } A \text{ a } b \text{ jsou závislé na době po odstavení reaktoru, typu reaktoru, paliva apod.}$$

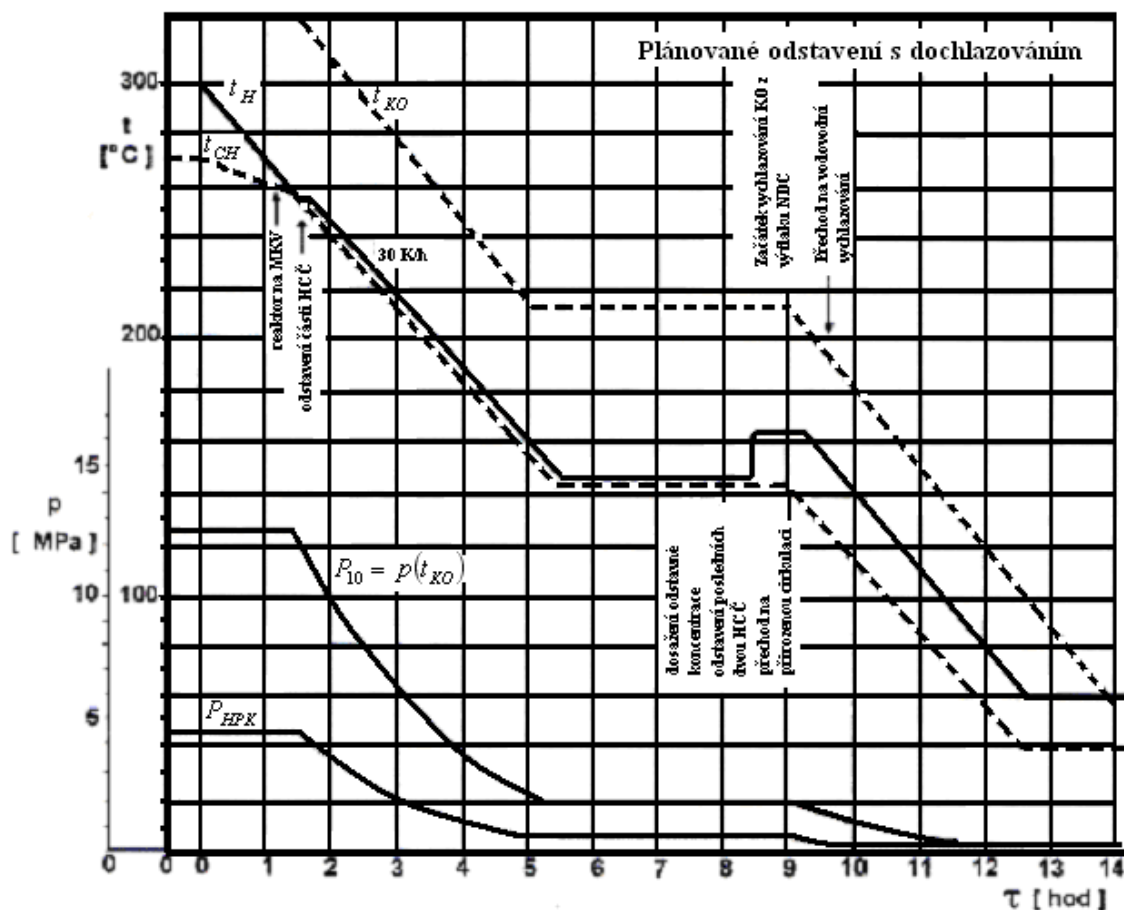
Tepelný výkon odváděný chladivem z odstaveného reaktoru je pak součtem výkonových podílů z jednotlivých zdrojů tepla závislosti na čase. [14]

## 6. Plánované odstavení bloku a vychlazování primárního okruhu

Pokud nechceme překročit dovolené trendy ochlazování primárního okruhu, je nutné snižovat výkon reaktoru rychlostí zhruba  $1\% N_{nom}/\text{minutu}$ .

Snižování výkonu bloku provádí personál při konstantním tlaku páry v hlavním parním kolektoru (HPK) postupem analogickým zvyšování výkonu bloku. Po snížení výkonu turbogenerátoru (TG) na nulu provede personál postupné odstavení jednotlivých TG uzavřením rychlouzavíracích ventilů a parní výkon se převede. Režim ruční

regulace reaktoru snižuje operátor výkon reaktoru. Teď je možné zahájit odstavení reaktoru zvyšováním koncentrace kyseliny borité v I.O. na odstavnou koncentraci při stále nucené cirkulaci vody v I.O. nejlépe všemi, ale alespoň dvěma, resp. Třemi hlavními cirkulačními čerpadly (HCČ). Zvyšováním koncentrace  $H_3BO_3$  ve vodě I.O. by mělo být ukončeno do zahájení vychlazování I.O. Vychlazování I.O. je nutné organizovat současně v celém objemu I.O.. Výměna vody v odstavných smyčkách se děje zpětnou cirkulací, kompenzátoru řízenou cirkulací prostřednictvím sprchového systému. Vychlazování I.O. se provádí postupným řízeným snižováním tlaku páry. (Obr. 7.1) [15]



Obr. 7.1 Plánované odstavení s dochlazováním [15]

## 7. Návrh výměníku

### 7.1 Pevnostní kontrola

#### Pevnostní kontrola trubek

Výpočet tloušťky stěny se provádí pro statické namáhání od vnitřního přetlaku dle ČSN 690010. [16] [17]

Z konstrukčních parametrů výměníku je zadán tlak havarijního okruhu :  
 $P = 0,6 [MPa]$

Zeslabení stěny účinkem koroze je  $c = 0,0005 [m]$ .

Teplosměnné trubky jsou vyrobeny z materiálu 10GN2MFA.

#### Chemické složení 10GN2MFA:

|      | C    | Mn   | Si   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Mo   | V    | Ti    | Al    |
|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| min. | 0,08 | 0,80 | 0,17 | -     | -     | -    | 1,80 | -    | 0,40 | 0,03 | -     | 0,005 |
| max. | 0,12 | 1,10 | 0,37 | 0,008 | 0,005 | 0,30 | 2,30 | 0,30 | 0,70 | 0,07 | 0,015 | 0,035 |

Tab. 1: Směrné chemické složení oceli 10GN2MFA [18]

#### Mechanické vlastnosti 10GN2MFA

| Mechanické vlastnosti při teplotě |                         |                       |          |                             |                            |                         |                       |          |                             | Teplota<br>křehkosti<br>T <sub>K0</sub> |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|-----------------------------|---|
| +20°C                             |                         |                       |          |                             | +350°C                     |                         |                       |          | -10°C                       |   |
| R <sub>p0,2</sub><br>[MPa]        | R <sub>M</sub><br>[MPa] | A <sub>5</sub><br>[%] | Z<br>[%] | KCV<br>[J.cm <sup>2</sup> ] | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | R <sub>M</sub><br>[MPa] | A <sub>5</sub><br>[%] | Z<br>[%] | KCV<br>[J.cm <sup>2</sup> ] |   |
| 345-590                           | 540-700                 | 18                    | 60       | 59                          | min.295                    | min.490                 | 15                    | 55       | 39                          | max. -10°C                              |

Tab. 2: Požadavky na mechanické vlastnosti oceli 10GN2MFA [18]

Z toho vyplývá že:

- mez kluzu v tahu  $R_e = 300 - 500 [MPa]$
- mez pevnosti v tahu  $R_m = 520 - 690 [MPa]$

Minimální dovolené napětí při součiniteli bezpečnosti k mezi kluzu  $k_k = 3$

$$\sigma_{Dmin} = \frac{R_e}{k_k}$$

$$\sigma_{Dmin} = \frac{300}{3} = 100 [MPa] \quad (7.1)$$

### Výpočtová tloušťka stěny přímé trubky

$$s = \left( \frac{P \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{D_{\min}} + P} \right) + c$$
$$s = \left( \frac{0,6 \cdot 0,013}{2 \cdot 100 + 0,6} \right) + 0,0005 = 0,000538[m] \quad (7.2)$$

### Tlak pro hydraulickou zkoušku

Pro hydraulickou zkoušku se požaduje zvýšený tlak a jeho hodnota je:

$$P_H = 1,25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{Dt,z}}{\sigma_{Dt,d}}$$
$$P_H = 1,25 \cdot 0,6 \cdot \frac{300}{240} = 0,9375[MPa] \quad (7.3)$$

Hodnota  $\sigma_{Dt,z}$  je dovolené napětí materiálu v tahu, při teplotě zkoušky  $t = 20 [^{\circ}\text{C}]$

- mez kluzu v tahu  $\text{Re} = 320 [\text{MPa}]$

$$\sigma_{Dt,z} = \frac{\text{Re}}{k_k}$$
$$\sigma_{Dt,z} = \frac{320}{1,5} = 213,3[MPa] \quad (7.4)$$

Volím součinitel meze kluku  $k_k = 1,5$

Stejným způsobem se určí hodnota napětí materiálu v tahu, při teplotě teplotní:

$t = 55 [^{\circ}\text{C}]$

- mez kluzu v tahu  $\text{Re} = 300 [\text{MPa}]$

$$\sigma_{Dt,z} = \frac{\text{Re}}{k_k}$$
$$\sigma_{Dt,z} = \frac{300}{1,5} = 200[MPa] \quad (7.5)$$

Volím součinitel meze kluku  $k_k = 1,5$



### Dovolené napětí materiálu v tahu při teplotě zkoušky

$$\sigma_{D\min} = \frac{Re}{k_k}$$
$$\sigma_{\min} = \frac{300}{1,5} = 200 [MPa]$$
(7.6)

### Tloušťka pro hydraulickou zkoušku

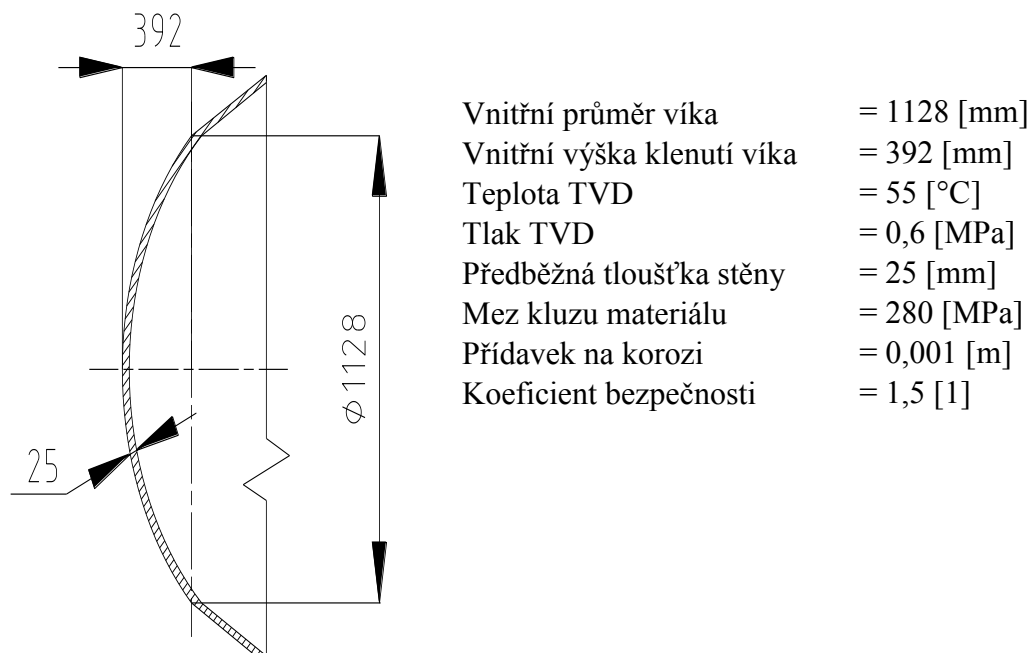
$$s = \left( \frac{P_H \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{\min} + P_H} \right) + c$$
$$s = \left( \frac{0,9375 \cdot 0,013}{2 \cdot 200 + 0,9375} \right) + 0,0005 = 0,00053 [m]$$
(7.7)

$0,53 [mm] \leq 1,5 [mm] \rightarrow$  tloušťka stěny vyhovuje

Pro konstrukci přímých trubek v havarijním výměníku je volena tloušťka stěny 1,5 [mm], z důvodu namáhání materiálu a bezpečnosti je tloušťka stěny trubek vyšší, než vypočítána.

### Pevnostní kontrola klenutého víka

Výpočet se provádí pomocí veličin z tepelného a konstrukčního návrhu.



Obr. 7.1 Schéma klenutého dna

### Minimální dovolené napětí v tahu

$$\sigma = \frac{R_e}{k_k}$$
$$\sigma = \frac{280}{1,5} = 186,6 [\text{MPa}] \quad (7.8)$$

### Minimální součinitel pevnosti

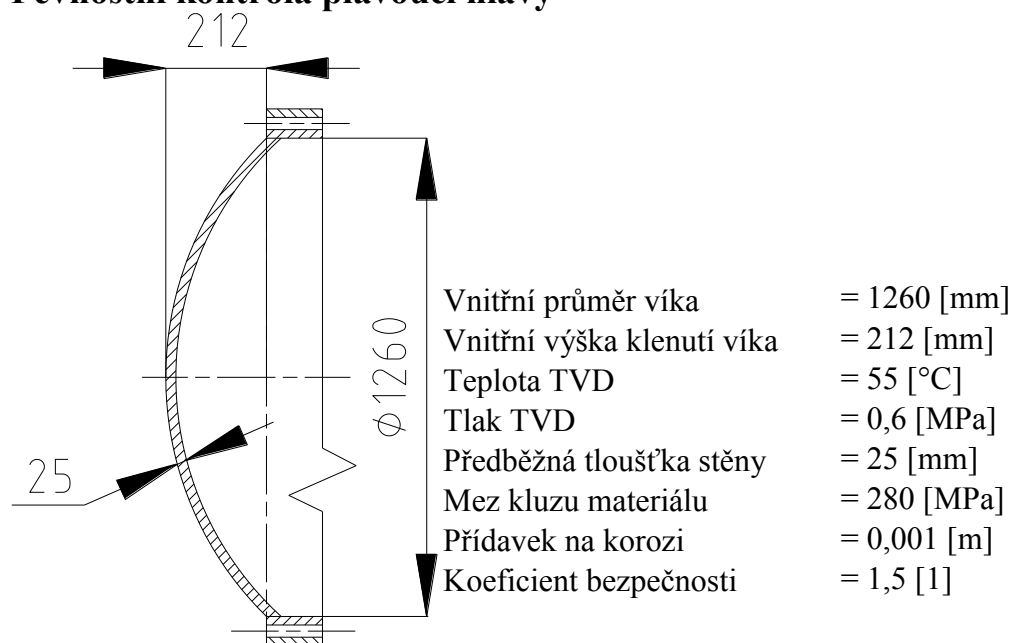
$$\varphi = \frac{P_k \cdot D^2}{4 \cdot (s - c) \cdot 2 \cdot \sigma}$$
$$\varphi = \frac{0,6 \cdot 1,128^2}{4 \cdot (0,025 - 0,001) \cdot 2 \cdot 186,6} = 0,0213 [1] \quad (7.9)$$

### Tloušťka stěny

$$s = \frac{P_k \cdot D^2}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma} + c$$
$$s = \frac{0,6 \cdot 1,128^2}{4 \cdot 0,0213 \cdot 186,6} + 0,001 = 0,025 [\text{m}] \quad (7.10)$$

Navržená tloušťka stěny víka vyhovuje, volím tloušťku víka 25[mm]

### Pevnostní kontrola plavoucí hlavy



Obr. 7.2 Schéma plavoucí hlavy

### Minimální dovolené napětí v tahu

$$\sigma = \frac{R_e}{k_k}$$

$$\sigma = \frac{280}{1,5} = 186,6 [MPa] \quad (7.11)$$

### Minimální součinitel pevnosti

$$\varphi = \frac{P_k \cdot D^2}{4 \cdot (s - c) \cdot 2 \cdot \sigma}$$

$$\varphi = \frac{0,6 \cdot 1,26^2}{4 \cdot (0,025 - 0,001) \cdot 2 \cdot 186,6} = 0,0265 [1] \quad (7.12)$$

### Tloušťka stěny

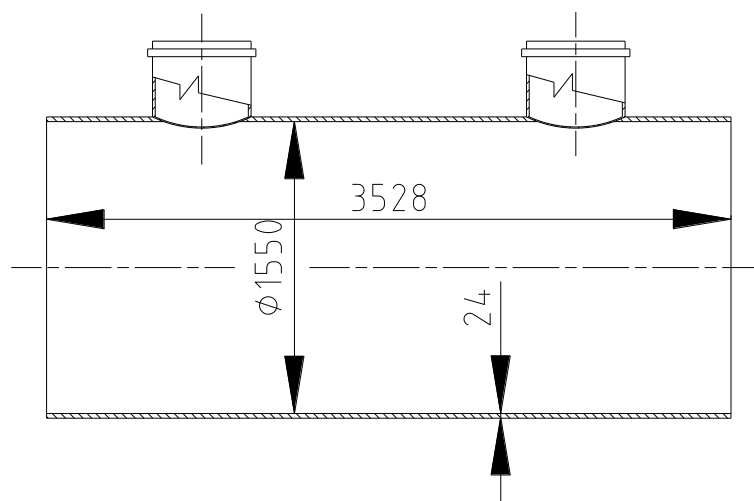
$$s = \frac{P_k \cdot D^2}{4 \cdot \varphi \cdot \sigma} + c$$

$$s = \frac{0,6 \cdot 1,26^2}{4 \cdot 0,0375 \cdot 186,6} + 0,001 = 0,02501 [m] \quad (7.13)$$

Navržená tloušťka stěny plavoucí hlavy vyhovuje, volím tloušťku plavoucí hlavy 25[mm]

### Pevnostní kontrola pláště

Výpočet se zabývá pouze přední válcovou částí havarijního výměníku. Tento úsek má rozměry.



Obr. 7.3 Schéma pláště

|                |             |
|----------------|-------------|
| Vnitřní průměr | = 1550 [mm] |
| Tloušťka       | = 24 [mm]   |
| Délka          | = 3528 [mm] |

### Kontrola pevnosti válcové části

Plášť havarijního výměníku je z materiálu 10GN2MFA, pro nějž je teplota při dané maximální mezi kluzu  $Re = 280$  [MPa]. Výpočet se provádí s bezpečnostním koeficientem  $k_k = 3$ .

### Minimální dovolené napětí

$$\sigma = \frac{Re}{k_k}$$

$$\sigma = \frac{280}{3} = 93,334 [MPa] \quad (7.14)$$

### Minimální součinitel pevnosti

$$\varphi = \frac{P_k \cdot [D + (s - c)]}{2 \cdot (s - c) \cdot \sigma}$$

$$\varphi = \frac{0,6 \cdot [1550 + (24 - 1)]}{2 \cdot (24 - 1) \cdot 93,334} = 0,219 [1] \quad (7.15)$$

### Minimální tloušťka stěny

$$s_M = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot \sigma - P_k}$$

$$s_M = \frac{0,6 \cdot 1,55}{2 \cdot 93,334 - 0,6} = 0,00499 [m] \quad (7.16)$$

### Tloušťka stěny válcové části

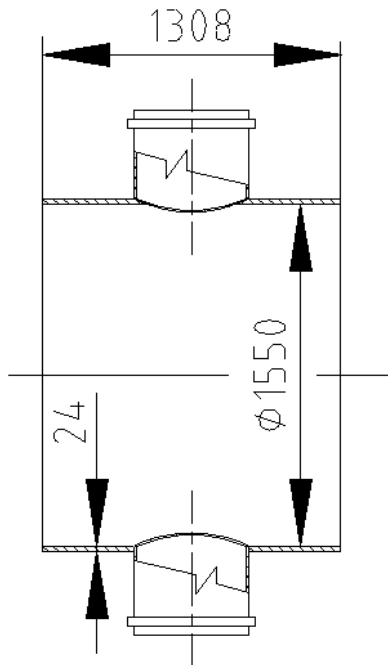
$$s_v = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - P_k} + c$$

$$s_v = \frac{0,6 \cdot 1550}{2 \cdot 93,334 \cdot 0,00499 - 0,6} + 0,001 = 0,024 [m] \quad (7.17)$$

Z podmínky, že zvolená tloušťka stěny havarijního výměníku je větší než tloušťka stěny dosažená výpočtem. Tloušťka stěny válcové části havarijního výměníku je volena 24 [mm].

## Pevnostní kontrola zadní části pláště havarijního výměníku

Výpočet se zabývá pouze horní válcovou částí havarijního výměníku. Tento úsek má rozměry:



Vnitřní průměr = 1550 [mm]  
Tloušťka = 24 [mm]  
Délka = 1308 [mm]

Obr. 7.4 Schéma zadní části

### Kontrola pevnosti válcové zadní části pláště havarijního výměníku

Plášť havarijního výměníku je z materiálu 10GN2MFA, pro nějž je teplota při dané maximální mezi kluzu  $R_e = 280$  [MPa]. Výpočet se provádí s bezpečnostním koeficientem  $k_k = 3$ .

#### Minimální dovolené napětí

$$\sigma = \frac{R_e}{k_k}$$
$$\sigma = \frac{280}{3} = 93,334 [\text{MPa}] \quad (7.18)$$

#### Minimální součinitel pevnosti

$$\varphi = \frac{P_k \cdot [D + (s - c)]}{2 \cdot (s - c) \cdot \sigma}$$
$$\varphi = \frac{0.6 \cdot [1550 + (24 - 1)]}{2 \cdot (24 - 1) \cdot 93,334} = 0,219 [1] \quad (7.19)$$

### Minimální tloušťka stěny

$$s_M = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot \sigma - P_k}$$
$$s_M = \frac{0,6 \cdot 1550}{2 \cdot 93,334 - 0,6} = 0,00499[m] \quad (7.20)$$

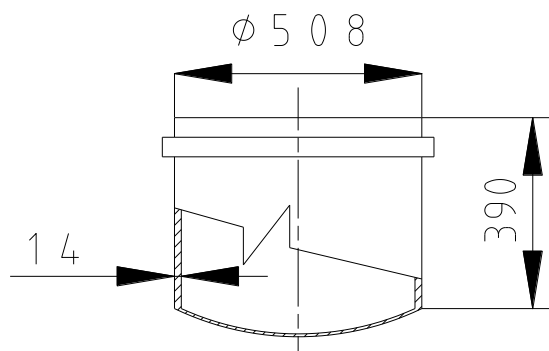
### Tloušťka stěny válcové části

$$s_v = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - P_k} + c$$
$$s_v = \frac{0,6 \cdot 1550}{2 \cdot 93,334 \cdot 0,9306 - 0,6} + 0,001 = 0,024[m] \quad (7.21)$$

Z podmínky, že zvolená tloušťka stěny zadní části havarijního výměníku je větší než tloušťka stěny dosažená výpočtem. Tloušťka stěny válcové části havarijního výměníku je volena 24 [mm].

### Pevnostní kontrola nátrubků

Havarijní výměník má 2 přívodní nátrubky a 2 odvodní nátrubky. Nátrubky jsou vyrobeny z materiálu 10GN2MFA. Zeslabení stěny účinkem koroze je  $c = 0,0005$  [m].



Obr. 7.5 Schéma nátrubku

|               |            |
|---------------|------------|
| Vnější průměr | = 508 [mm] |
| Tloušťka      | = 14 [mm]  |
| Délka         | = 390 [mm] |

Pevnostní vlastnosti 10GN2MFA

|   |                     |                     |
|---|---------------------|---------------------|
| - | mez kluzu v tahu    | Re= 300 - 500 [MPa] |
| - | mez pevnosti v tahu | Rm= 520 - 690 [MPa] |

**Minimální dovolené napětí při součiniteli bezpečnosti k mezi kluzu  $k_k = 3$**

$$\begin{aligned}\sigma_{D\min} &= \frac{Re}{3} \\ \sigma_{D\min} &= \frac{300}{3} = 100 [MPa]\end{aligned}\quad (7.22)$$

**Výpočtová tloušťka stěny přímé trubky**

$$\begin{aligned}s &= \left( \frac{P \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{D\min} + P} \right) + c \\ s &= \left( \frac{0,6 \cdot 0,48}{2 \cdot 100 + 0,6} \right) + 0,0005 = 0,00143 [m]\end{aligned}\quad (7.23)$$

**Tlak pro hydraulickou zkoušku**

Pro hydraulickou zkoušku se požaduje zvýšený tlak a jeho hodnota je:

$$\begin{aligned}P_H &= 1,25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{Dt,z}}{\sigma_{Dt,d}} \\ P_H &= 1,25 \cdot 0,6 \cdot \frac{300}{240} = 0,9375 [MPa]\end{aligned}\quad (7.24)$$

Hodnota  $\sigma_{Dt,z}$  je dovolené napětí materiálu v tahu, při teplotě zkoušky  $t = 20 [^{\circ}C]$

**Dovolené napětí materiálu v tahu při teplotě zkoušky**

$$\begin{aligned}\sigma_{D\min} &= \frac{Re}{k_k} \\ \sigma_{D\min} &= \frac{300}{3} = 100 [MPa]\end{aligned}\quad (7.25)$$

**Tloušťka pro hydraulickou zkoušku**

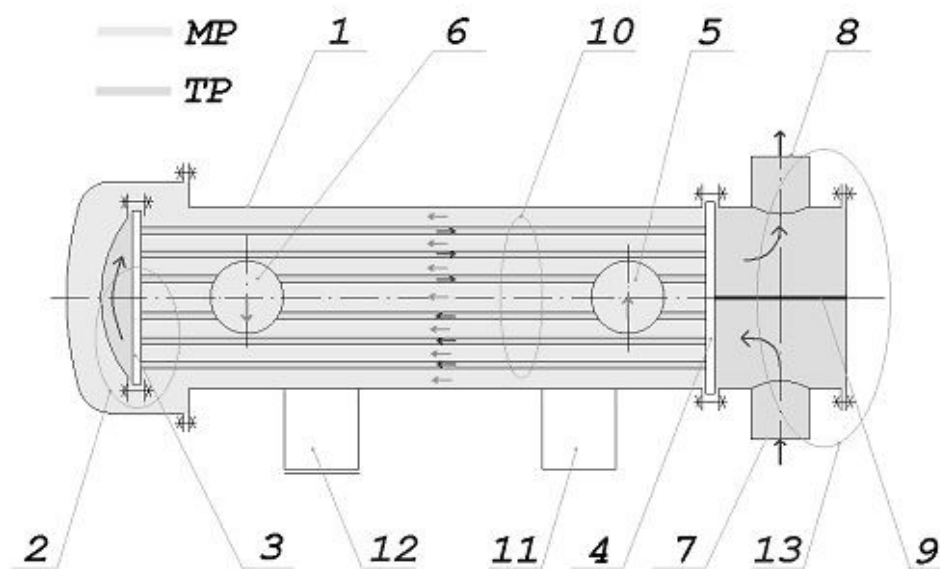
$$\begin{aligned}s &= \left( \frac{P_H \cdot d_1}{2 \cdot \sigma_{\min} + P_H} \right) + c \\ s &= \left( \frac{0,9375 \cdot 0,48}{2 \cdot 100 + 0,9375} \right) + 0,0005 = 0,00273 [m]\end{aligned}\quad (7.26)$$

$2,73 [mm] \leq 14 [mm] \rightarrow$  tloušťka stěny vyhovuje

Pro konstrukci nátrubků v havarijním výměníku je volena tloušťka stěn 14 [mm].

## Konstrukce

Konstrukce výměníků je patrná ze schematu na obr. 7.6. Výměníky havarijního dochlazování jsou konstruovány jako trubkové výměníky s plovoucí hlavou. Ke sdílení tepla dochází v tzv. trubkovém svazku (10), což je svazek několika tisíc tenkých trubek. Trubky svazku jsou na okrajích připevněny do trubkovic. Trubkovnice jsou masivní kruhové děrované desky. U výměníků s plovoucí hlavou je jedna trubkovnice pevná a druhá tzv. plovoucí. Na obr. 1 je pevná trubkovnice (4) sevřena mezi příruba pláště (1) a komory (13) (tzv. sevřená trubkovnice), existují též konstrukční provedení s trubkovicí přivařenou k plášti (1). Plovoucí trubkovnice (3) je součástí plovoucí hlavy (2), kterou kromě ní tvoří ještě víko plovoucí hlavy s přírubou a tzv. dělený zámek (viz dále). Konstrukce výměníku s plovoucí hlavou umožňuje volnou teplotní dilataci trubkového svazku. Dalšími částmi výměníku jsou dno pláště (1) připevněné přírubovým spojem, hrdla (5,6) v plášti (1) pro vstup a výstup horkého roztoku  $H_3BO_3$  a komora (13) s přepážkou (9) a hrdly (7,8) pro vstup a výstup chladicí vody. Výměník je uložen na sedlových podporách (11,12), z nichž jedna musí být kluzná (12), aby byla umožněna volná teplotní dilatace pláště (1) výměníku.[17]



Obr. 7.6 Schéma výměníku havarijního dochlazování [19]

## 7.2 Tepelný výpočet

### Popis výměníků

Tepelný výpočet se provádí pro výměník havarijního dochlazování jaderného reaktoru. Jedná se o trubkový výměník typu s plovoucí hlavou, voda-voda + kyselina boritá, je vyroben z oceli 10GN2MFA, rozebíratelné konstrukce. Teplosměnná plocha je tvořena 3150 trubek. V hladkých trubkách Tr016x1,5 protéká ohříváné médium voda (tzv. Technická voda důležitá), délka trubek je 3,920 [m], přes šest přepážek protéká voda s ředěnou kyselinou boritou. Průměr výměníku je 1750 [mm], délka výměníku je 6850 [mm].



Základní vztahy a konstanty pro výpočty vycházejí z [20], [21], [22]

### Vstupní parametry médií

| Médium      | Vstup[° C] | Výstup[°C] |
|-------------|------------|------------|
| Ohřívání    | 40         | 70         |
| Ochlazování | 150        | 90         |

Tab. 3: Vstupní a výstupní hodnoty

### Průtok média

Technická voda důležitá (TVD) 3000  $[m^3 \cdot h^{-1}] \rightarrow 0,8333 [m^3 \cdot s^{-1}]$  - ohřívání  
médium

Zředěný roztok ( $H_3BO_3$ ) 1500  $[m^3 \cdot h^{-1}] \rightarrow 0,4166 [m^3 \cdot s^{-1}]$  - ochlazování  
médium

### Rychlost proudění

$$\begin{aligned}\dot{w}_t &= 2,54 [m \cdot s^{-1}] \\ \dot{w}_s &= 1,04 [m \cdot s^{-1}]\end{aligned}\tag{7.27}$$

### Průtočné množství

$$\begin{aligned}\dot{V}_t &= 1,6 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}] \\ \dot{V}_s &= 0,42 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}]\end{aligned}\tag{7.28}$$

### Hmotnostní tok vody

$$\begin{aligned}\dot{M}_t &= 833,3 [kg \cdot s^{-1}] \\ \dot{M}_s &= 416,6 [kg \cdot s^{-1}]\end{aligned}\tag{7.29}$$

### Odpor na straně ohřívání média

Teplosměnnou plochu ohřívání média tvoří 3150 trubek o rozměru 16x1,5 [mm].

### Průtočná plocha ohřívání média

$$\begin{aligned}S_t &= \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot n [m^2] \\ S_t &= \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} \cdot 3150 = 0,418 [m^2]\end{aligned}\tag{7.30}$$

kde n je počet trubek

### **Střední teplota vody ohříváního média**

$$t_{st} = \frac{t_{1t} + t_{2t}}{2} [^{\circ}C]$$
$$t_{st} = \frac{40 + 70}{2} = 55 [^{\circ}C] \quad (7.31)$$

### **Fyzikální vlastnosti ohříváního média**

$$c_p = 4,1822 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\lambda = 0,647 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\dot{v} = 0,5109 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}]$$
$$\rho = 985,7 [kg \cdot m^{-3}]$$

*Příloha č. 1 - Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98[kPa], popř. při tlaku na mezi sytosti.*

### **Výpočet hmotnostního průtoku ohříváního média**

$$\dot{m}_t = \rho_t \cdot \dot{V}_t [kg \cdot s^{-1}] \quad (7.32)$$
$$\dot{m}_t = 985,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} = 0,1577 [kg \cdot s^{-1}]$$

### **Výpočet tepelného výkonu ohříváního média**

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_t \cdot c_{pt} \cdot (t_{12} - t_{11}) [W] \quad (7.33)$$
$$\dot{Q}_t = 0,1577 \cdot 4,1822 \cdot 10^3 \cdot (70 - 40) = 19785,98 [W]$$

### **Rychlost proudění vody v trubce ohříváního média**

$$\dot{w}_t = \frac{\dot{M}_t}{\rho \cdot S} [m \cdot s^{-1}] \quad (7.34)$$
$$\dot{w}_t = \frac{833,3}{985,7 \cdot 0,418} = 2,54 [m \cdot s^{-1}]$$

### **Reynoldsovo kritérium ohříváního média**

$$R_{et} = \frac{\dot{w}_t \cdot d_1}{\dot{v}} [1] \quad (7.35)$$
$$R_{et} = \frac{2,54 \cdot 0,013}{0,5109 \cdot 10^{-6}} = 6463 [1]$$

### Součinitel teplotní vodivosti ohřívajícího média

Charakterizuje rychlost vyrovnání teplot při nestacionárním vedení tepla.

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_t &= \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} [m^2 \cdot s^{-1}] \\ \dot{\alpha}_t &= \frac{0,647}{4,1822 \cdot 10^3 \cdot 985,7} = 1,56 \cdot 10^{-7} [m^2 \cdot s^{-1}]\end{aligned}\quad (7.36)$$

### Prandtlovo kritérium ohřívajícího média

$$\begin{aligned}Pr_t &= \frac{\nu}{a} [1] \\ Pr_t &= \frac{0,5109 \cdot 10^{-6}}{1,56 \cdot 10^{-7}} = 3,26 [1]\end{aligned}\quad (7.37)$$

### Nusseltovo kritérium ohřívajícího média

Pro rozvinuté turbulentní proudění v trubce kruhového průřezu bez zřetele na směr tepelného toku je nejlépe možno stanovit hodnotu Nusseltova kritéria na základě Kraussoldovy rovnice, pro  $Re \geq 10^4$  a  $Pr = 0,7$  až 2500 pak platí:

$$\begin{aligned}Nu_t &= 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} [1] \\ Nu_t &= 0,023 \cdot 64631^{0,8} \cdot 3,26^{0,33} = 239,57 [1]\end{aligned}\quad (7.38)$$

### Součinitel přestupu tepla na straně ohřívajícího média

$$\begin{aligned}\alpha_t &= \frac{\lambda \cdot Nu}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \\ \alpha_t &= \frac{0,647 \cdot 239,57}{0,013} = 11923 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]\end{aligned}\quad (7.39)$$

### Odpor na straně ohřívajícího média

$$\begin{aligned}R_t &= \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_t} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \\ R_t &= \frac{16}{13} \cdot \frac{1}{11923} = 10,322 \cdot 10^{-5} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]\end{aligned}\quad (7.40)$$

## Odpor stěny trubky

### Střední teplota stěny

$$t_{st} = \frac{t_{st} + t_{sk}}{2} [^{\circ}\text{C}]$$
$$t_{st} = \frac{55 + 62}{2} = 58,5 [^{\circ}\text{C}] \quad (7.41)$$

Tepelná vodivost je rovna hustotě tepelného toku mezi plochami v jednotkové vzdálenosti při jednotkovém rozdílu teplot. Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ , který závisí na teplotě a obsahu jednotlivých prvků ocelí.

Přenos tepla je způsobován vibračními vlnami atomových mřížek a pohybem volných elektronů.

$$\lambda_{st'} = 1,163 [B \cdot (635 - t_{sts}) \cdot 10^{-2} + 28,8] [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\lambda_{st'} = 1,163 [3,13 \cdot (635 - 58,5) \cdot 10^{-2} + 28,8] = 54,48 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7.42)$$

Pro ocel 10GN2MFA je hodnota  $B=3,13[1]$ .

### Odpor stěny trubky

$$R_{st'} = \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{st'}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$
$$R_{st'} = \frac{0,016}{2 \cdot 54,48} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} = 3,049 \cdot 10^{-5} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \quad (7.43)$$

## Odpor na straně ochlazovaného média

### Fyzikální vlastnosti ochlazovaného média

$$c_p = 4,25 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\lambda = 0,685 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$
$$\dot{v} = 0,246 \cdot 10^{-6} [m^3 \cdot s^{-1}]$$
$$\rho = 946,5 [kg \cdot m^{-3}]$$

*Příloha č. 1 - Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98[kPa], popř. při tlaku na mezi sytosti.*

### Výpočet hmotnostního průtoku ochlazovaného média

$$\dot{m}_s = \rho_s \cdot \dot{V}_s [kg \cdot s^{-1}]$$
$$\dot{m}_t = 946,5 \cdot 0,42 \cdot 10^{-4} = 0,103975 [kg \cdot s^{-1}] \quad (7.44)$$

### Výpočet tepelného výkonu ochlazovaného média

$$\begin{aligned}\dot{Q}_s &= \dot{m}_s \cdot c_{ps} \cdot (t_{21} - t_{22}) \\ \dot{Q}_s &= 0,03975 \cdot 4,25 \cdot 10^3 \cdot (150 - 90) = 10136,25 [W]\end{aligned}\quad (7.45)$$

### Vnější průtokový průřez ochlazovaného média

$$\begin{aligned}S_s &= \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - L \cdot 0,016 [m^2] \\ S_s &= \frac{\pi \cdot 1,55^2}{4} - 3,628 \cdot 0,016 = 1,82 [m^2]\end{aligned}\quad (7.46)$$

### Celkový omočený obvod ochlazovaného média

$$\begin{aligned}o &= \pi \cdot D_1 - 2 \cdot d_2 + 2 \cdot L [m] \\ o &= \pi \cdot 1,82 - 2 \cdot 0,016 + 2 \cdot 3,628 = 12,94 [m]\end{aligned}\quad (7.47)$$

### Ekvivalentní hydraulický průměr ochlazovaného média

$$\begin{aligned}d_{ekv} &= \frac{4 \cdot S}{o} [m] \\ d_{ekv} &= \frac{4 \cdot 1,82}{12,94} = 0,562 [m]\end{aligned}\quad (7.48)$$

### Rychlost proudění ochlazovaného média

$$\begin{aligned}\dot{w}_s &= \frac{\dot{M}_s}{\rho \cdot S} [m \cdot s^{-1}] \\ \dot{w}_s &= \frac{416,3}{946,5 \cdot 12,94} = 1,04 [m \cdot s^{-1}]\end{aligned}\quad (7.49)$$

### Reynoldsovo kritérium

$$\begin{aligned}R_{es} &= \frac{\dot{w}_s \cdot d_{ekv}}{\nu} [1] \\ R_{es} &= \frac{1,04 \cdot 0,562}{0,246 \cdot 10^{-6}} = 456910 [1]\end{aligned}\quad (7.50)$$

### Součinitel teplotní vodivosti

$$\begin{aligned}\dot{a}_s &= \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} [m^2 \cdot s^{-1}] \\ \dot{a}_s &= \frac{0,685}{4,25 \cdot 10^3 \cdot 946,5} = 1,7 \cdot 10^{-7} [m^2 \cdot s^{-1}]\end{aligned}\quad (7.51)$$

### Prandtlovo kritérium ochlazovaného média

$$\begin{aligned}Pr_s &= \frac{\nu}{a} [1] \\Pr_s &= \frac{0,246 \cdot 10^{-6}}{1,7 \cdot 10^{-7}} = 0,764 [1]\end{aligned}\tag{7.52}$$

### Nusseltovo kritérium pro ochlazované médium

Pro tepelný výpočet na základě měření je Žukauskasem doporučován vztah, pro příčné obtékání trubek, s platností  $Pr = 0,7 - 500 [1]$ ,  $Re = 30 - 1200000 [1]$ , při určovací teplotě látky. Pak platí vztah z [25].

$$\begin{aligned}Nu_s &= 0,3 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,4} [1] \\Nu_s &= 0,3 \cdot 456910^{0,6} \cdot 0,764^{0,4} = 668,17 [1]\end{aligned}\tag{7.53}$$

### Součinitel přestupu tepla pro ochlazované médium

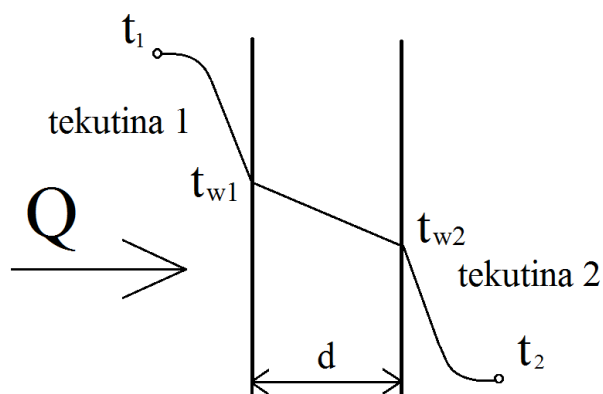
$$\begin{aligned}\alpha_s &= \frac{\lambda_s \cdot Nu_s}{d_1} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \\ \alpha_s &= \frac{0,685 \cdot 668,17}{1,55} = 295,28 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]\end{aligned}\tag{7.54}$$

### Odpor na straně ohřívajícího média

$$\begin{aligned}R_s &= \frac{1}{\alpha_s} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}] \\ R_s &= \frac{1}{295,28} = 3,386 \cdot 10^{-5} [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]\end{aligned}\tag{7.55}$$

### Součinitel prostupu tepla

Pokud máme na mysli přenos tepla z jedné tekutiny do druhé přes nějakou pevnou přepážku (např. přes stěnu trubky), pak hovoříme o prostupu tepla. Na obr. 7.7 je schematicky znázorněna taková situace. Horká tekutina je oddělena od studené tekutiny pevnou rovinnou stěnou. Tepelný tok je přenášen postupně konvekcí z horké tekutiny, jejíž teplota je  $t_1$  do povrchu stěny s teplotou  $tw_1$ , pak vedením stěnou a opět konvekcí z druhého povrchu stěny o teplotě  $tw_2$  do studené tekutiny o teplotě  $t_2$ . [23]



Obr. 7.7 Přestup tepla rovinou stěnou

$$k = \frac{1}{R_t + R_{st} + R_s} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$k = \frac{1}{10,322 \cdot 10^{-5} + 3,049 \cdot 10^{-5} + 3,386 \cdot 10^{-5}} = 5967 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (7.56)$$

#### Střední tepelný výkon

$$\dot{Q}_{str} = \frac{\dot{Q}_t + \dot{Q}_s}{2} [W]$$

$$\dot{Q}_{str} = \frac{19785,98 + 10136,25}{2} = 14961,11 [W] \quad (7.57)$$

#### Výpočet vodního ekvivalentu ohřívajícího média

$$\dot{W}_t = c_{pt} \cdot M_t [kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}] \quad (7.58)$$

kde  $c_{pt}$  je střední měrná tepelná kapacita ohřívajícího média

$$\dot{W}_t = 4,25 \cdot 833,3 = 3541,53 [kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}]$$

#### Výpočet vodního ekvivalentu ochlazovaného média

$$\dot{W}_s = c_{ps} \cdot M_s [kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}] \quad (7.59)$$

kde  $c_{ps}$  je střední měrná tepelná kapacita ochlazovaného média

$$\dot{W}_s = 4,1822 \cdot 416,6 = 1739,79 [kJ \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}]$$

## Výpočet parametrů

Z literatury [24]

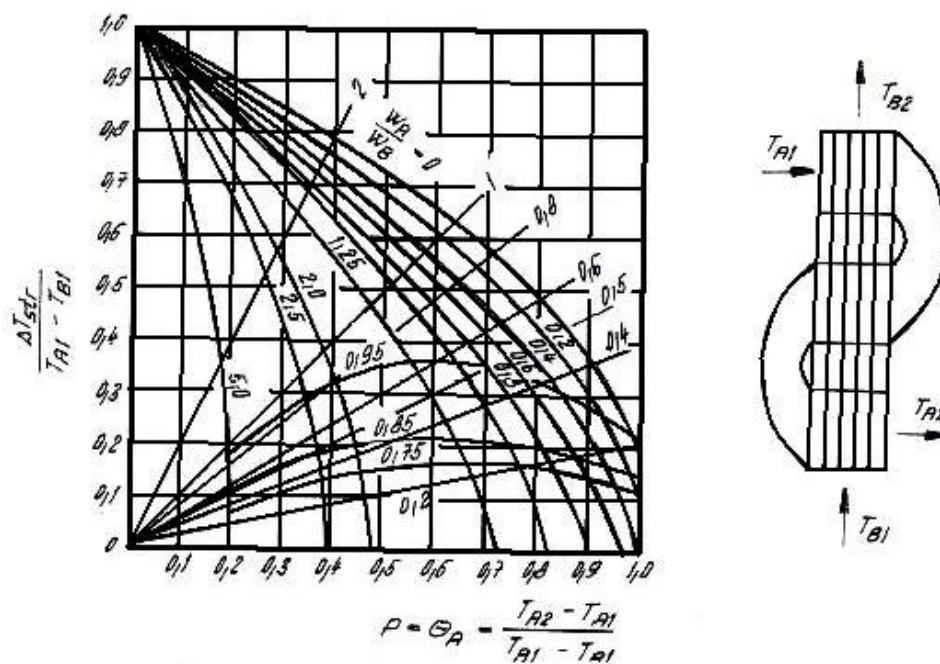
$$P_1 = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{T_{s1} - T_{t1}} \quad [1] \quad (7.60)$$

$$P_1 = \frac{150 - 90}{150 - 40} = 0,5454 [1]$$

$$R_1 = \frac{\dot{W}_s}{\dot{W}_t} \quad [1] \quad (7.61)$$

$$R_1 = \frac{1739,79}{3541,53} = 0,4911 [1]$$

kde  $P; R$  odečteme z obr. 9.2



Obr. 7.8 Teplotních poměrů ve výměníku [24]

$$\frac{\Delta T_{stř}}{T_{s1} - T_{t1}} = 0,3 \quad (7.62)$$

odtud

$$\Delta T_{stř} = 0,3 \cdot (150 - 40) = 33 [^{\circ}\text{C}] \quad (7.63)$$



### Výpočet teplosměnné délky

$$S_d = \frac{\dot{M}_s \cdot c_{ps} \cdot (T_{s1} - T_{s2})}{k \cdot \Delta T_{stř}} [m] \quad (7.64)$$

$$S_d = \frac{416,6 \cdot 10^3 \cdot 4,1822 \cdot (150 - 90)}{167,63 \cdot 33} = 18897 [m]$$

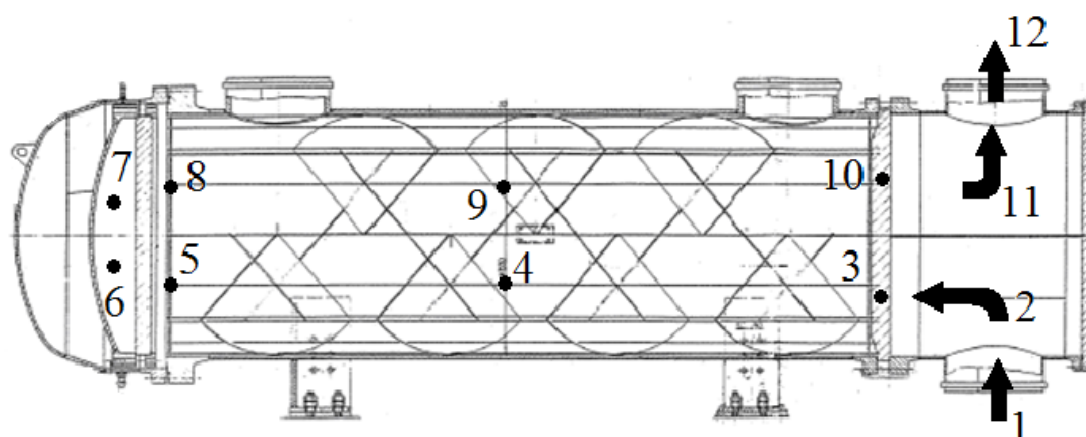
### Počet trubek

$$Tr = \frac{S}{l} [1] \quad (7.65)$$

$$Tr = \frac{18897}{5,5} = 3150 [1]$$

Počet trubek v havarijním výměníku je 3150 [1] trubek.

### 7.3 Hydraulický výpočet



- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Přívodní potrubí                  | 7 Místní ztráta v ohybu              |
| 2 Místní ztráta v ohybu             | 8 Místní ztráta na vstupu do trubek  |
| 3 Místní ztráta na vstupu do trubek | 9 Třecí ztráta v trubkách            |
| 4 Třecí ztráta v trubkách           | 10 Místní ztráta na výstupu z trubek |
| 5 Místní ztráta na výstupu z trubek | 11 Místní ztráta v ohybu             |
| 6 Místní ztráta v ohybu             | 12 Odvodní potrubí                   |

Obr. 7.9 Hydraulické ztráty v havarijním výměníku [8]

## Přívodní potrubí

Přívodní potrubí technické vody důležité je z materiálu 10GN2MFA a je provedeno z... Trubka TR 508 x 14 x 319

### Plocha průřezu

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} [m^2]$$
$$S_1 = \frac{\pi \cdot 0,48^2}{4} = 0,1809 [m^2] \quad (7.66)$$

kde  $d_1$  je vnitřní průměr trubky TR 508 x 14

### Rychlost TVD v trubce

$$\dot{w}_1 = \frac{m_1}{\rho_1 \cdot S_1} [m \cdot s^{-1}]$$
$$\dot{w}_1 = \frac{833,3}{985 \cdot 0,1804} = 4,675 [m \cdot s^{-1}] \quad (7.67)$$

### Reynoldsovo číslo

$$R_e = \frac{\dot{w}_1 \cdot d_1}{\dot{\nu}} [1]$$
$$R_e = \frac{4,675 \cdot 0,48}{0,5109 \cdot 10^{-6}} = 4392362 [1] \quad (7.68)$$

kde  $\dot{\nu}$  je kinematická viskozita vody při teplotě 55[°C]

### Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[26]

$$\lambda_1 = 0,0054 \cdot 0,369 \cdot Re^{-0,3} [1]$$
$$\lambda_1 = 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 4392362^{-0,3} = 0,00557 [1] \quad (7.69)$$

### Tlaková ztráta v přívodním potrubí

Třením:

$$\Delta p_{z1} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z1} = 0,00557 \cdot \frac{0,319}{0,408} \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 46,92 [Pa] \quad (7.70)$$

kde  $l_1$  je délka potrubí

### Místní ztráta v ohybu

Součinitel odporu je  $\xi_1 = 0,1[1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z2} &= \xi_1 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z2} &= 0,1 \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 1076,38 [Pa]\end{aligned}\tag{7.71}$$

### Místní ztráta na vstupu do trubek

#### Plocha průřezu

$$\begin{aligned}S_3 &= \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} [m^2] \\ S_3 &= \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 0,000132 [m^2]\end{aligned}\tag{7.72}$$

kde  $d_2$  vnitřní průměr trubky TR 16x1,5

#### Rychlost na vstupu do trubek

$$\begin{aligned}\dot{w}_2 &= \frac{m_1}{h \cdot \rho_1 \cdot S_3} [m \cdot s^{-1}] \\ \dot{w}_2 &= \frac{833,3}{1571 \cdot 985 \cdot 0,000132} = 4,069 [m \cdot s^{-1}]\end{aligned}\tag{7.73}$$

kde  $h$  je počet trubek do kterých vstupuje TVD

### Místní ztráta na vstupu do trubek

Součinitel odporu je  $\xi_2 = 0,1[1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z3} &= \xi_2 \cdot \frac{\dot{w}_2^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z3} &= 0,1 \cdot \frac{4,069^2}{2} \cdot 985 = 815,5 [Pa]\end{aligned}\tag{7.74}$$

## Třecí ztráta v trubkách

### Reynoldsovo číslo

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\dot{w}_3 \cdot d_2}{\dot{\nu}} [1] \\ \text{Re} &= \frac{2,54 \cdot 0,013}{0,5109 \cdot 10^{-6}} = 4852935 [1] \end{aligned} \quad (7.75)$$

kde  $\dot{\nu}$  je kinematická viskozita vody při teplotě 55[°C] což je střední teplota TVD

### Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[26]

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot \text{Re}^{-0,3} [1] \\ \lambda_2 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 4852935^{-0,3} = 0,00904 [1] \end{aligned} \quad (7.76)$$

### Tlaková ztráta v trubkách

Třením:

$$\begin{aligned} \Delta p_{z4} &= \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z4} &= 0,00557 \cdot \frac{3,92}{0,013} \cdot \frac{2,54^2}{2} \cdot 985 = 8661,3 [Pa] \end{aligned} \quad (7.77)$$

kde  $l_2$  je délka trubky

### Místní ztráta na výstupu z trubek

Místní odpor pro trubku na výstupu je  $\xi_3 = 0,001 [1]$

Místní odpor pro 1575 trubek je :

$$\begin{aligned} \Sigma \xi &= 1575 \cdot \xi_3 [1] \\ \Sigma \xi &= 1575 \cdot 0,001 = 15,75 [1] \end{aligned} \quad (7.78)$$

### Tlaková ztráta na výstupu

$$\begin{aligned} \Delta p_{z5} &= \Sigma \xi \cdot \frac{\dot{w}_3^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z5} &= 15,75 \cdot \frac{2,54^2}{2} \cdot 985 = 50044 [Pa] \end{aligned} \quad (7.79)$$

### Místní ztráta v ohybu

Součinitel odporu je  $\xi_4 = 0,1[1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z6} &= \xi_4 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z6} &= 0,1 \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 1076,38 [Pa]\end{aligned}\tag{7.80}$$

### Místní ztráta v ohybu

Součinitel odporu je  $\xi_5 = 0,1[1]$

$$\begin{aligned}\Delta p_{z7} &= \xi_5 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z7} &= 0,1 \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 1076,38 [Pa]\end{aligned}\tag{7.81}$$

### Místní ztráta na vstupu do trubek

#### Plocha průřezu

$$\begin{aligned}S_3 &= \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} [m^2] \\ S_3 &= \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4} = 0,000132 [m^2]\end{aligned}\tag{7.82}$$

kde  $d_2$  vnitřní průměr trubky TR 16x1,5

#### Rychlost na vstupu do trubek

$$\begin{aligned}\dot{w}_2 &= \frac{m_1}{h \cdot \rho_1 \cdot S_3} [m \cdot s^{-1}] \\ \dot{w}_2 &= \frac{833,3}{1571 \cdot 985 \cdot 0,000132} = 4,069 [m \cdot s^{-1}]\end{aligned}\tag{7.83}$$

kde  $h$  je počet trubek do kterých vstupuje TVD

### Místní ztráta na vstupu do trubek

Součinitel odporu je  $\xi_2 = 0,1[1]$

$$\Delta p_{z8} = \xi_2 \cdot \frac{\dot{w}_2^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$

$$\Delta p_{z8} = 0,1 \cdot \frac{4,069^2}{2} \cdot 985 = 815,5 [Pa] \quad (7.84)$$

### **Třecí ztráta v trubkách**

#### **Reynoldsovo číslo**

$$R_e = \frac{\dot{w}_3 \cdot d_2}{\dot{\nu}} [1]$$

$$R_e = \frac{2,54 \cdot 0,013}{0,5109 \cdot 10^{-6}} = 4852935 [1] \quad (7.85)$$

kde  $\dot{\nu}$  je kinematická viskozita vody při teplotě 55[°C] což je střední teplota TVD

#### **Součinitel tření**

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[26]

$$\lambda_2 = 0,0054 \cdot 0,369 \cdot Re^{-0,3} [1]$$

$$\lambda_2 = 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 4852935^{-0,3} = 0,00904 [1] \quad (7.86)$$

### **Tlaková ztráta v trubkách**

Třením:

$$\Delta p_{z9} = \lambda_2 \cdot \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$

$$\Delta p_{z9} = 0,00557 \cdot \frac{3,92}{0,013} \cdot \frac{2,54^2}{2} \cdot 985 = 8661,3 [Pa] \quad (7.87)$$

kde  $l_2$  je délka trubky

### **Místní ztráta na výstupu z trubek**

Místní odpor pro trubku na výstupu je  $\xi_3 = 0,001 [1]$

Místní odpor pro 1575 trubek je :

$$\Sigma \xi = 1575 \cdot \xi_3 [1]$$

$$\Sigma \xi = 1575 \cdot 0,001 = 15,75 [1] \quad (7.88)$$

### Tlaková ztráta na výstupu

$$\Delta p_{z10} = \Sigma \xi \cdot \frac{\dot{w}_3^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z10} = 15,75 \cdot \frac{2,54^2}{2} \cdot 985 = 50044 [Pa] \quad (7.89)$$

### Místní ztráta v ohybu

Součinitel odporu je  $\xi_1 = 0,1 [1]$

$$\Delta p_{z11} = \xi_1 \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa]$$
$$\Delta p_{z11} = 0,1 \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 1076,38 [Pa] \quad (7.90)$$

### Odvodní potrubí

Odvodní potrubí technické vody důležité je z materiálu 10GN2MFA a je provedeno z... Trubka TR 508 x 14 x 319.

### Plocha průřezu

$$S_4 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} [m^2]$$
$$S_4 = \frac{\pi \cdot 0,48^2}{4} = 0,1809 [m^2] \quad (7.91)$$

kde  $d_1$  je vnitřní průměr trubky TR 508 x 14

### Rychlost TVD v trubce

$$\dot{w}_3 = \frac{m_1}{\rho_1 \cdot S_1} [m \cdot s^{-1}]$$
$$\dot{w}_3 = \frac{833,3}{985 \cdot 0,1804} = 4,675 [m \cdot s^{-1}] \quad (7.92)$$

### Reynoldsovo číslo

$$R_e = \frac{\dot{w}_1 \cdot d_1}{\dot{\nu}} [1]$$
$$R_e = \frac{4,675 \cdot 0,48}{0,5109 \cdot 10^{-6}} = 4392362 [1] \quad (7.93)$$

kde  $\dot{\nu}$  je kinematická viskozita vody při teplotě 55[°C]

## Součinitel tření

Výpočet podle Hermanna pro izotermní turbulentní proudění v hladkých kanálech.[26]

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot \text{Re}^{-0,3} [1] \\ \lambda_3 &= 0,0054 \cdot 0,369 \cdot 4392362^{-0,3} = 0,00557 [1]\end{aligned}\tag{7.94}$$

## Tlaková ztráta v přívodním potrubí

Třením:

$$\begin{aligned}\Delta p_{z12} &= \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{\dot{w}_1^2}{2} \cdot \rho_1 [Pa] \\ \Delta p_{z12} &= 0,00557 \cdot \frac{0,319}{0,408} \cdot \frac{4,675^2}{2} \cdot 985 = 46,92 [Pa]\end{aligned}\tag{7.95}$$

kde  $l_1$  je délka potrubí

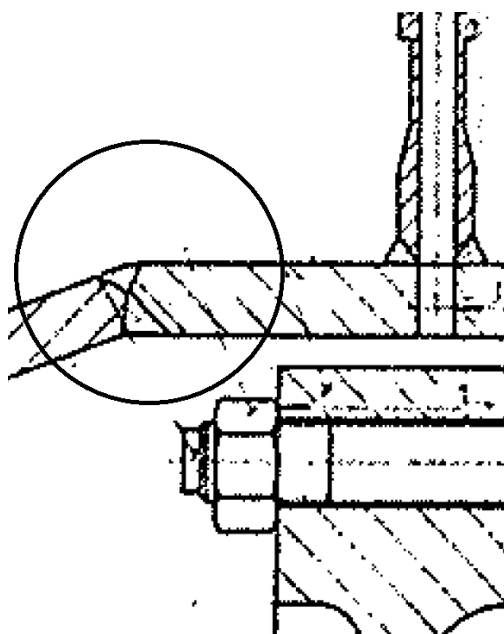
## Celková tlaková ztráta systému

$$\begin{aligned}\Delta p_{zC} &= \Delta p_{z1} + \Delta p_{z2} + \Delta p_{z3} + \Delta p_{z4} + \Delta p_{z5} + \Delta p_{z6} + \Delta p_{z7} + \Delta p_{z8} + \Delta p_{z9} + \Delta p_{z10} + \Delta p_{z11} + \Delta p_{z12} [kPa] \\ \Delta p_{zC} &= 46,92 + 1076 + 815 + 8661 + 50044 + 1076 + 1076 + 815 + 8661 + 50044 + 1076 + 46,92 \\ \Delta p_{zC} &= 123,43 [kPa]\end{aligned}\tag{7.96}$$

Celková ztráta systému TVD je 123,43 [kPa]



## 7.4 Technologický postup při svařování kroužků víka dna (MIP)



Obr. 7.10 Svar víka [8]

|                       |  |   |  |   |  |   |  |                             |  |   |  |
|-----------------------|--|---|--|---|--|---|--|-----------------------------|--|---|--|
| Výrobce/Manufacturer: |  | Zakázka č./Shop Order No.:<br><b>0001</b> |  | Zákazník/Customer:  |  | Smlouva č./Contract No.:<br><b>0001</b> |  | Dokument/Document:<br>MIP / |  | Č. dokumentu/Document No.:<br><b>0001</b> |  |
| P.č./Item No.: 1      |  | Materiál/Material:<br><b>10GN2MFA</b>     |  | Výrobek / Item:<br><b>Kroužek víka havarijního výměníku</b> |  | MANUFACTURING AND INSPECTION PLAN       |  | Systém/System:              |  | Str./Pg.: 1                               |  |
| P.č./Current No.:     |  |   |  |   |  |   |  |                             |  | z/of: 3                                   |  |

M- Výrobce/Manufacturer  
C- Zákazník/Customer  
TPI- Nezávislá inspekce/Third Part Inspection  
H- Bod zastavení/Hold Point  
R- Kontrola/Review- Přezkoumání dokumentů (záznamy,zprávy) útvarem ŘJ/TPI nebo zákazníkem /  
Review of documentation (report, record) by QA Department/TPI or Customer  
W- Svědečný bod/ Witness Point- Určený bod, o kterém musí být TPI/zákazník informován. V případě, že se TPI/zákazník zřekne účasti na "W", musí supervisor kontroly jakosti toto zřeknutí dokumentovat ve sloupci MIPu/ Designated point, the TPI/Customer shall be informed about. In case the TPI/Customer waives "W" the Supervisor shall document this waiver in the column of the MIP.

| REV | Zpracoval<br>Prepared | Datum<br>Date | Kontroloval<br>Reviewed | Datum<br>Date | Schválil<br>Approved | Datum<br>Date | Obsah revize /<br>Description of revision | Souhl.zákazníka<br>Customer release | Datum<br>Date | Souhlas TPI<br>TPI release | Datum<br>Date |
|-----|-----------------------|---------------|-------------------------|---------------|----------------------|---------------|---|-------------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| 0   | Víteček<br>Jaroslav   | 1.4.<br>2013  |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 1   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 2   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 3   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 4   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 5   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 6   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 7   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |
| 8   |                       |               |                         |               |                      |               |   |                                     |               |                            |               |

|             | Výrobce / Manufacturer:  | Zakázka č. / Shop Order No.:<br>0001 | Zakazník / Customer:             | Smlouva č. / Contract No.:<br>0001                    | Document / Document<br>MIP / | C. documents / Document No.:<br>0001 |               |
|-------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------------|---------------|
|             |  | Ř.č. / Item No.: 1                   | Material / Materiál:<br>10GN2MFA | Výrobek / Item:<br>Kroutek vřka havarijního<br>výmřku |                              | System / System:                     | Str. / Pg.: 2 |
|             |  | B.č. / Contract No.:                 |                                  |   |                              |                                      | z.č. / : 3    |
| Krok / Step | Popis / Description  | Číslo dokumentu / Document No.       | Okraj. Rev. / Actual Rev.        | Intep. podp. dat. / Inspection sign. date             | Záznam č. / Record No.       | Poznámky / Remarks                   |               |
| 1           | 002 – Kontrola značení materiálu   |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 2           | 003 – Vstupní kontrola materiálu – vizuální a rozměrová kontrola, kontrola atestové dokumentace a režim tepelného zpracování |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 3           | Vstupní kontrola svařovacího materiálu – drát SV-10N26MA, tavítko FC-16, sušení 620±10°C po dobu 4 + 0,5 hod.                |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 4           | Kontrola kvalifikace svářeče   |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 5           | 301 – Vizuální kontrola  |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 6           | 321 – Nedestruktivní zkouška ultrazvukem   |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 7           | Kontrola rozměru před svařováním   |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 8           | Úprava svarových hran obráběním  |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 9           | Vizuální a rozměrová kontrola  |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 10          | 331 – Povrchová zkouška magnet. práškovou metodou  |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |
| 11          | Sestavení ke svařování, odmaštění a očištění povrchu materiálu   |                                      |                                  |   |                              |                                      |               |

|    |  |  |  |  |  |  |  |
|----|--|--|--|--|--|--|--|
| 12 | Vizuální a rozměrová kontrola  |  |  |  |  |  |  |
| 13 | Předehřev- Teplota předehřevu 120°C – 270°C  |  |  |  |  |  |  |
| 14 | 121 - Svařování- automatické svařování pod tavítkem  |  |  |  |  |  |  |
| 15 | 301 – Vizuální kontrola  |  |  |  |  |  |  |
| 16 | Tepelné zpracování- Žihání pro odstranění pnutí (hned po svaření – než materiál vychladne); teplota žihání 620±10°C po dobu 5 hod. |  |  |  |  |  |  |
| 17 | Očištění povrchu materiálu   |  |  |  |  |  |  |
| 18 | 301 – Vizuální kontrola  |  |  |  |  |  |  |
| 19 | 331 – Povrchová zkouška magnet. práškovou metodou- zjištění vady   |  |  |  |  |  |  |
| 20 | 321 – Nedestruktivní zkouška ultrazvukem   |  |  |  |  |  |  |
| 21 | Vybroušení místa vady, zdokumentování místa vybrání vady   |  |  |  |  |  |  |
| 22 | Vstupní kontrola svařovacího materiálu – obalená elektroda PT-50, sušení 320±20°C po dobu 2 + 0,5 hod.                             |  |  |  |  |  |  |
| 23 | Kontrola klasifikace svářeče EN 287-111 T BW 2Bt130 PA   |  |  |  |  |  |  |
| 24 | 301 – Vizuální kontrola  |  |  |  |  |  |  |
| 25 | 331 – Povrchová zkouška magnet. práškovou metodou v místě vybrání vady   |  |  |  |  |  |  |

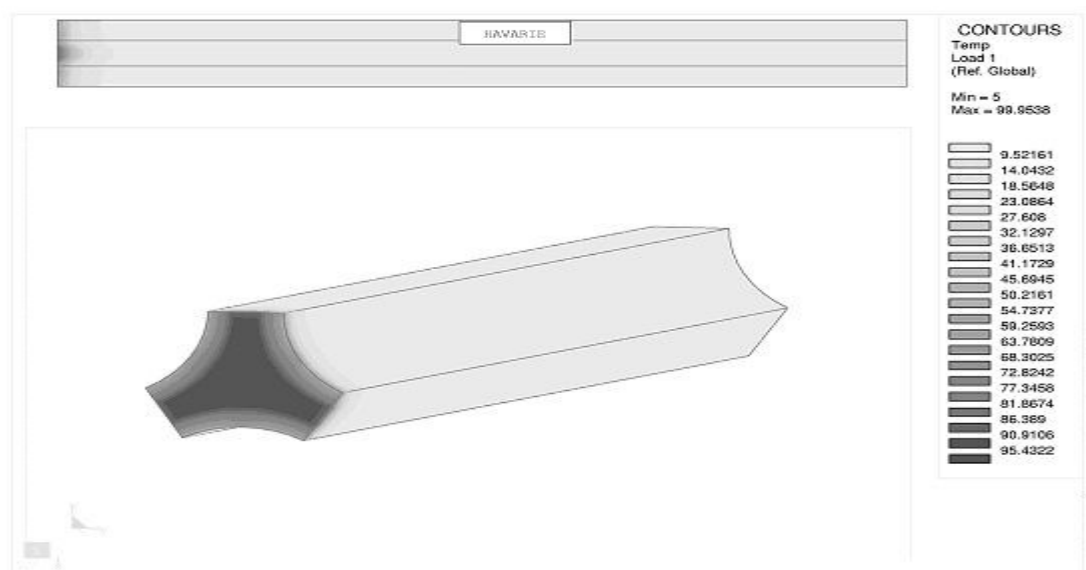
|      |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 26   | Přehřív- Teplota přehřív<br>120°C – 270°C  |  |  |  |  |  |  |  |
| 27   | 111 - Svařování- ruční obloukové<br>svařování obalenou elektrodou  |  |  |  |  |  |  |  |
| 28   | Teplné zpracování- Žihání pro<br>odstranění pnutí (hned po svaření<br>– než materiál vychladne); teplota<br>žihání 620±10°C po dobu 5 hod. |  |  |  |  |  |  |  |
| 29   | Očištění povrchu materiálu-<br>v místě svařování   |  |  |  |  |  |  |  |
| 30   | 301 – Vizualní kontrola  |  |  |  |  |  |  |  |
| 31   | 331 – Povrchová zkouška magnet.<br>práškovou metodou v místě<br>opravy vady  |  |  |  |  |  |  |  |
| 32   | 321 – Nedestruktivní zkouška<br>ultrazvukem- v místě opravy vady   |  |  |  |  |  |  |  |
| 33   | Očištění povrchu materiálu-<br>v místě svařování   |  |  |  |  |  |  |  |
| N.A. |  |  |  |  |  |  |  |  |
| N.A. |  |  |  |  |  |  |  |  |
| N.A. |  |  |  |  |  |  |  |  |

## 7.5 Pevnostní výpočet v Programu ANSYS

Materiál poskytl výrobce havarijního výměníku KRÁLOVOPOLSKÁ, a.s., zpracován v programu ANSYS. [19]

### Trubkovnice

Dalším problematickým uzlem při výpočtech výměníků jsou trubkovnice. Jak bylo uvedeno výše, jsou to masivní kruhové desky s malými průchozími kruhovými otvory. Z důvodu velkého množství těchto otvorů je prakticky nereálné vytvoření podrobného 3D MKP modelu trubkovnic. Trubkovnice je tedy nutné modelovat jako desky plné, bez otvorů, ovšem s náhradními mechanickými vlastnostmi v děrované oblasti. V normě [1] jsou uváděny jednoduché analytické vztahy pro výpočty koeficientů tuhosti trubkovnic a koeficientů napětí závislé na rozteči a průměru otvorů. V normě ASME [3] je uvedena podrobná metodika výpočtu napjatosti trubkovnic, jejichž součástí jsou grafy pro výpočet náhradních mechanických vlastností - Youngova modulu pružnosti  $E^*$  a Poissonova čísla  $\mu^*$  závislé na rozteči otvorů a můstků mezi otvory. Koeficienty pro výpočty maximální intenzity napětí, uváděné v grafech v normách ASME [3], jsou kromě rozteče a můstku závislé též na tzv. koeficientech dvouosé napjatosti. Podle grafů uvedených v normě ASME [3] je též možné vypočítat špičková napětí v řezech pronikajících děrované pole trubkovnice pod různými úhly, nebo napětí vyvolané teplotním polem. Pro výpočty náhradních mechanických vlastností trubkovnic lze též s výhodou použít postupy spočívající v přesném namodelování malé reprezentativní děrované oblasti (kvádru) a zjišťování mechanických vlastností (pomocí MKP) tohoto vzorku. Dalším problémem při výpočtech trubkovnic je výpočet teplotního pole trubkovnice pro výpočty termomechanických napětí. Celé děrované pole trubkovnice lze sestavit z malých trojstranných segmentů. Pomocí takového segmentu byla provedena analýza průběhu teplot v děrovaném poli trubkovnice (viz Obr. 7.11).[19]



Obr. 7.11 Trubkovnice [19]

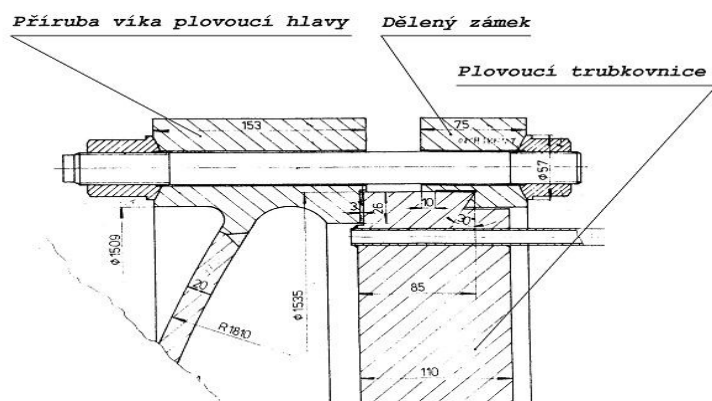
## Trubkový svazek

Při MKP výpočtech výměníků je trubkový svazek modelován zejména z důvodu výztužného účinku na trubkovnice a z důvodu přenosu zatížení z jedné trubkovnice na druhou prostřednictvím trubkového svazku. V případě rotačně symetrických výpočtových modelů (většinou) se trubkový svazek modeluje systémem koaxiálních válců. Tuhost náhradního systému koaxiálních válců ve směru osy výměníku je shodná s tuhostí nahrazovaného svazku. U trubkového svazku byl též zkoumán vliv dosednutí trubkového svazku na plášť výměníku a trubkovnici pomocí samostatného nelineárního modelu včetně kontaktní úlohy dosednutí přepážek na plášť. Úloha byla řešena pro statická a seizmická zatížení. Výsledkem bylo určení namáhání pláště v místě dosednutí přepážky trubkového svazku a přídavného zatížení sevřené trubkovnice.

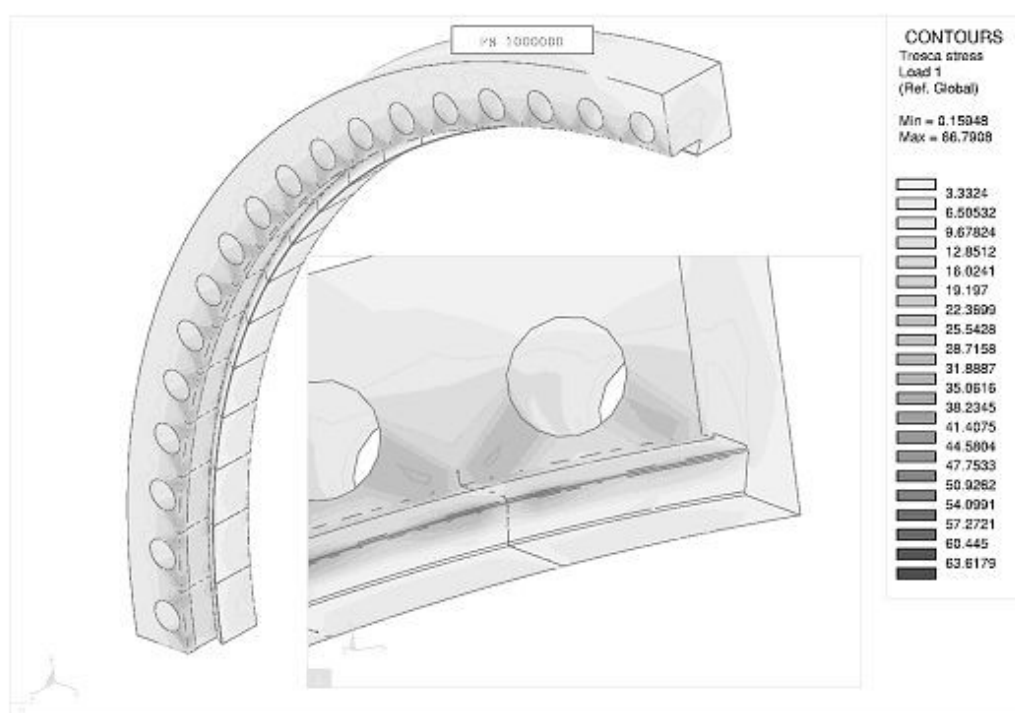
## Dělený zámek

V oblasti plovoucí hlavy je kromě jiných (plovoucí trubkovnice, přírubový spoj) problematickým uzlem tzv. dělený zámek. Dělený zámek je kroužek opatřený ozubem s jehož pomocí je k plovoucí trubkovnici připojen přes přírubový spoj víko plovoucí hlavy (viz Obr. 7.12). Z montážních důvodů je tento kroužek po obvodě rozdělen minimálně na 2 části. - napjatost vyvolaná jednotkovou silou ve šroubech.

V druhé fázi byl vytvořen rotačně symetrický model děleného zámku a plovoucí trubkovnice. Tento rotačně symetrický model sloužil k vyšetřování chování děleného zámku v místech styku s plovoucí trubkovnicí - kontaktní úloha.[19]

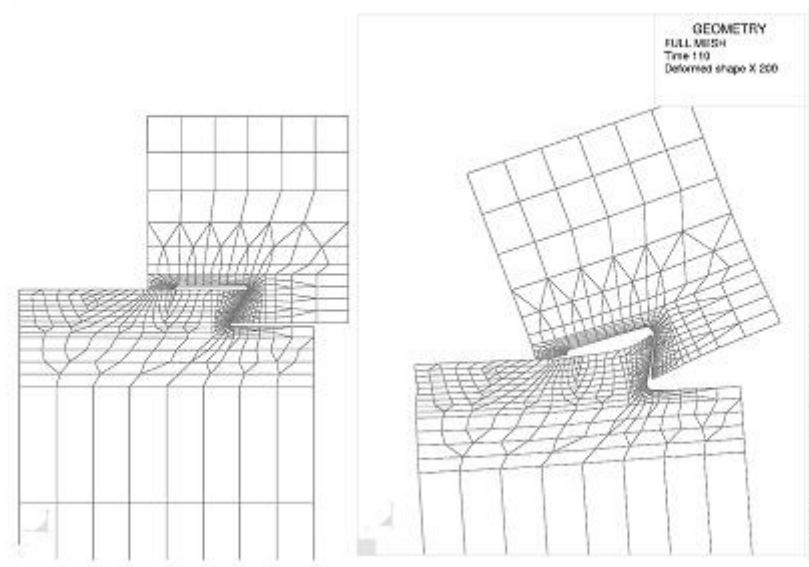


Obr. 7.12 Dělený zámek [19]



Obr. 7.13 3D model děleného zámku [19]

Díky tomuto modelu bylo mimo jiné zjištěno, že během namáhání děleného zámku silou ve šroubech dochází ke zmenšení kontaktní plochy a k jejímu posuvu směrem ke kořeni ozubu děleného zámku.



*Obr. 7.14 Deformace v místě styku dělený zámek - plovoucí trubkovnice [19]*

## 8. Závěr

Havarijní dochlazování aktivní zóny jaderné elektrárny MIR 1200 lze dělit na několik zabezpečovacích systému: sprchový havarijní systém; nízkotlaký systém havarijního a normálního dochlazování aktivní zóny; systém havarijního vysokotlakého doplňování a vstřikování; systém ohřevu nádrže - jímky. Tyto čtyři systémy jsou potřebné k bezpečnému chodu jaderné elektrárny MIR 1200.

Havarijní výměník MIR 1200 je sestaven z válcové ocelové nádoby o průměru 1750 [mm]. Na konci válce je tzv. plavoucí hlava. Délka výměníku je 6850 [mm], délka trubek je 3,92 [m]. Havarijní výměník má dva vstupy a dva výstupy. První médium je technická voda důležitá, která se ohřívá z teploty 40 [°C] na 70 [°C]. Druhé médium je silně zředěná voda s kyselinou boritou, která se ochlazuje ze 150 [°C] na 90 [°C]. Technická voda důležitá protéká trubkami a silně zředěná voda s kyselinou boritou protéká přes přepážky havarijního výměníku. Havarijní výměník vyrábí Královopolské strojířny a.s. v Brně.

Mým úkolem bylo navrhnout havarijní výměník MIR 1200. Z nákresu sem udělal pevnostní kontrolu zda odpovídají tloušťky stěn trubky a částí havarijního výměníku. Trubky mají průměr 16 x 1,5 [mm], tloušťka pláště výměníku je 24 [mm], tloušťka víka a plavoucí hlavy je 25 [mm] a nátrubku který má průměr 508 x 14 [mm]. Navrhované tloušťky odpovídaly výpočtům.

Ze vstupních hodnot jsem vypočítal střední tepelný výkon 14961,11 [W]. Součinitel přestupu tepla, přes Reynoldsovo a Nusseltovo číslo, což je 5967 [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] a na závěr jsem určil počet trubek 3150 [1].

Dále jsem udělal hydraulický výpočet, kde probíhal výpočet technické vody důležité. Jednalo se o dvanáct ztrát a celková ztráta havarijního výměníku je 123,43 [kPa]. Celková ztráta systému je v normě.

K závěru proběhl technologický postup při svařování víka havarijního výměníku a návrh kontroly nedestruktivních zkoušek a popřípadě opravu svaru. Z poskytnutých materiálů Královopolských strojířen a.s. jsem zapojil do diplomové práce i výsledky z programu ANSYS.

## 9. Seznam použité literatury

- [1] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD\\_reaktor#VVER.2FPWR](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_reaktor#VVER.2FPWR)
- [2] <http://www.gvp.cz/~vondrackova/Fyzika/3.E-%20refer%C3%A1ty%20-elektromagnetismus/14-Jadern%C3%A1%20elektr%C3%A1rna-VAJNAR.pdf>
- [3] <http://ekolist.cz/fotobanka/displayimage.php?pos=-68>
- [4] <http://www.skoda-js.cz/cs/mir-1200/index.shtml>
- [5] JÁNOŠÍK, J. : Kompenzátor objemu jaderné elektrárny. TUO-VŠB 2010.
- [6] ZAORAL, M. : Hlavní cirkulační čerpadlo BIKS 500. ČVUT 2010.
- [7] [http://ok1zed.sweb.cz/s/el\\_jaderna.htm](http://ok1zed.sweb.cz/s/el_jaderna.htm)
- [8] Materiály poskytl Prof. Ing. Kolat Pavel, DrSc.
- [9] ALTSHULLER, A. *Saint Petersburg Institute "Atomenergoproekt"* [online]. [cit. 2010-04-26]. Dostupné z: <[http://www.reak.bme.hu/.../Atomstroyexport\\_03\\_SPbAEP\\_NPP-2006.pdf](http://www.reak.bme.hu/.../Atomstroyexport_03_SPbAEP_NPP-2006.pdf)>
- [10] ERMOLAEV, Vitaly. *Atomstroyexport* [online]. [cit. 2010-04-28]. Dostupné z: <<http://www.atomeromu.hu/download/1675/AES%202006%20reaktor.pdf>>
- [11] *MIR -1200, projekt nejen pro Českou republiku* [online]. 2010, poslední revize 01/2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupné z: <<http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/skodaJS.pdf>>
- [12] *atomstroyexport.com New Clear Energy* [online]. [cit. 2010-04-28]. Dostupné z: <[http://www.atomstroyexport.com/files/download/mir\\_eng.pdf](http://www.atomstroyexport.com/files/download/mir_eng.pdf)>
- [13] HEŘMANSKÝ, Bedřich. Bezpečnost jaderných elektráren I. Praha, 1998. 12 přednášek pro 5. ročník – Teorie a technika jaderných reaktorů, zimní semestr 2004.
- [14] HEŘMANSKÝ, B. : Termomechanika jaderných reaktorů. Nakladatelství československé akademie Praha 1987.
- [15] HEJZLAR, R.: Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 8-01-03190-X
- [16] ČERNÝ, J. a kolektiv. Parní kotle. Praha: SNTL, 1983.
- [17] SILBERNAGEL, A. Nauka o materiálu. Skripta VŠB Ostrava, 1990.



- [18] [http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal\\_07/Lists/Papers/130.pdf](http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/130.pdf)
- [19] <http://www2.it.cas.cz>
- [20] BLAHOŽ, V., LAPČÍK, V. Návody do cvičení z termomechaniky. Skripta VŠB Ostrava, 1989
- [21] VAKULENKO, I. Podogrivatěli vysogo davlenija. Moskva, 1985
- [22] KOLAT, P. Přenos tepla a hmoty. Skripta VŠB Ostrava, 1986.
- [23] WAGNER Vladimír. :: *OSEL.CZ* :: - *Reaktory III. generace* [online]. 2008, poslední revize 4.květen 2008 [cit. 2010-02-20]. Dostupné z: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3531>>
- [24] OSTREZI, J. : Tepelné výměníky a problematika jejich zanášení. VUT 2009
- [25] KRBEK, J., POLESNÝ, B. Závěrečný projekt. Výpočet tepelných turbín a jejich příslušenství. Uební text VUT Brno, 1987
- [26] DVOŘÁK, Z., Výměníky tepla (pro hydraulické a pneumatické stroje) Praha, ČVUT 1983.
- [27] ČERNÝ, V., JANEBA, B., TEYSSLER, J.: Parní kotle, SNTL Praha 1983

## 10. Přílohy

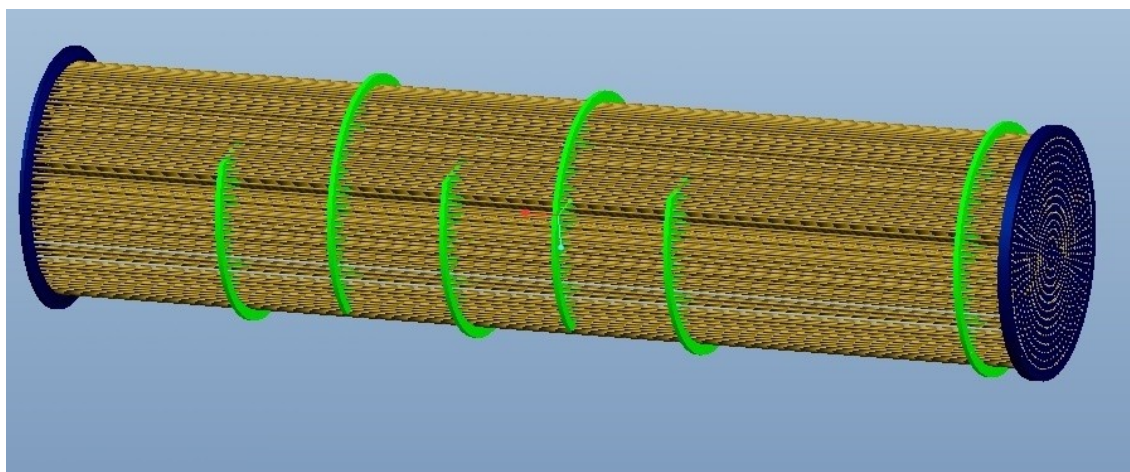
### Příloha č. 1

Fyzikální vlastnosti vody při tlaku 98,1 kPa, popř. při tlaku na mezi sytosti

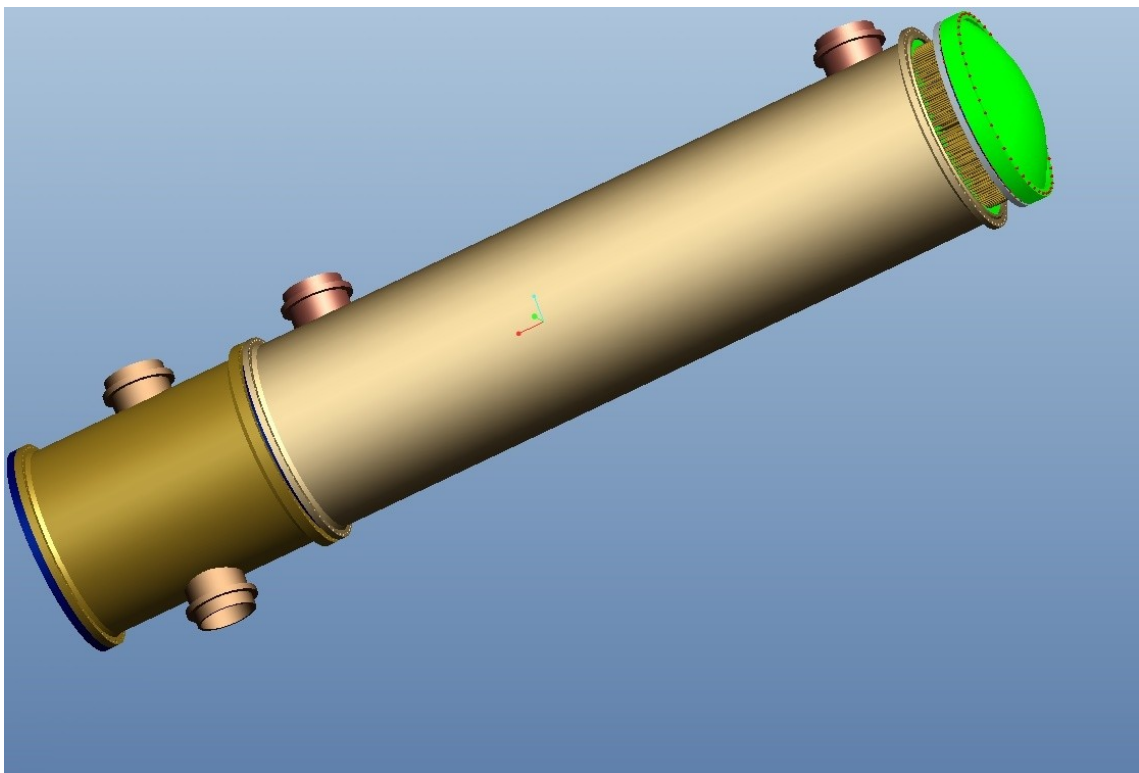
| <b>t</b><br>[°C] | <b><math>\rho</math></b><br>[kg m <sup>-3</sup> ] | <b><math>c_p</math></b><br>[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | <b><math>\lambda</math></b><br>[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] | <b><math>10^6 \eta</math></b><br>[Pa s] | <b><math>10^6 \nu</math></b><br>[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ] | <b><math>10^6 \alpha</math></b><br>[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ] | <b>Pr</b><br>[1] |
|------------------|---|--|---|---|---|--|------------------|
| 51               | 987,6   | 4180,8   | 0,642   | 537,2                                   | 0,5439  | 0,156  | 3,50             |
| 52               | 987,1   | 4181,2   | 0,643   | 528,4                                   | 0,5353  | 0,156  | 3,43             |
| 53               | 986,6   | 4181,5   | 0,644   | 519,9                                   | 0,5269  | 0,156  | 3,37             |
| 54               | 986,2   | 4181,9   | 0,646   | 511,6                                   | 0,5188  | 0,157  | 3,31             |
| 55               | 985,7   | 4182,2   | 0,647   | 503,6                                   | 0,5109  | 0,157  | 3,26             |
| 56               | 985,2   | 4182,6   | 0,648   | 495,7                                   | 0,5032  | 0,157  | 3,20             |
| 57               | 984,7   | 4183,0   | 0,649   | 488,1                                   | 0,4956  | 0,158  | 3,15             |
| 58               | 984,3   | 4183,4   | 0,650   | 480,6                                   | 0,4883  | 0,158  | 3,09             |
| 59               | 983,8   | 4183,9   | 0,651   | 473,4                                   | 0,4812  | 0,158  | 3,04             |
| 60               | 983,3   | 4184,3   | 0,652   | 466,3                                   | 0,4743  | 0,158  | 2,99             |
| .                | .   | .  | .   | .                                       | .   | .  | .                |
| .                | .   | .  | .   | .                                       | .   | .  | .                |
| .                | .   | .  | .   | .                                       | .   | .  | .                |
| 120              | 946,5   | 4250,1   | 0,685   | 201,1                                   | 0,2460  | 0,165  | 1,47             |

### Příloha č. 2

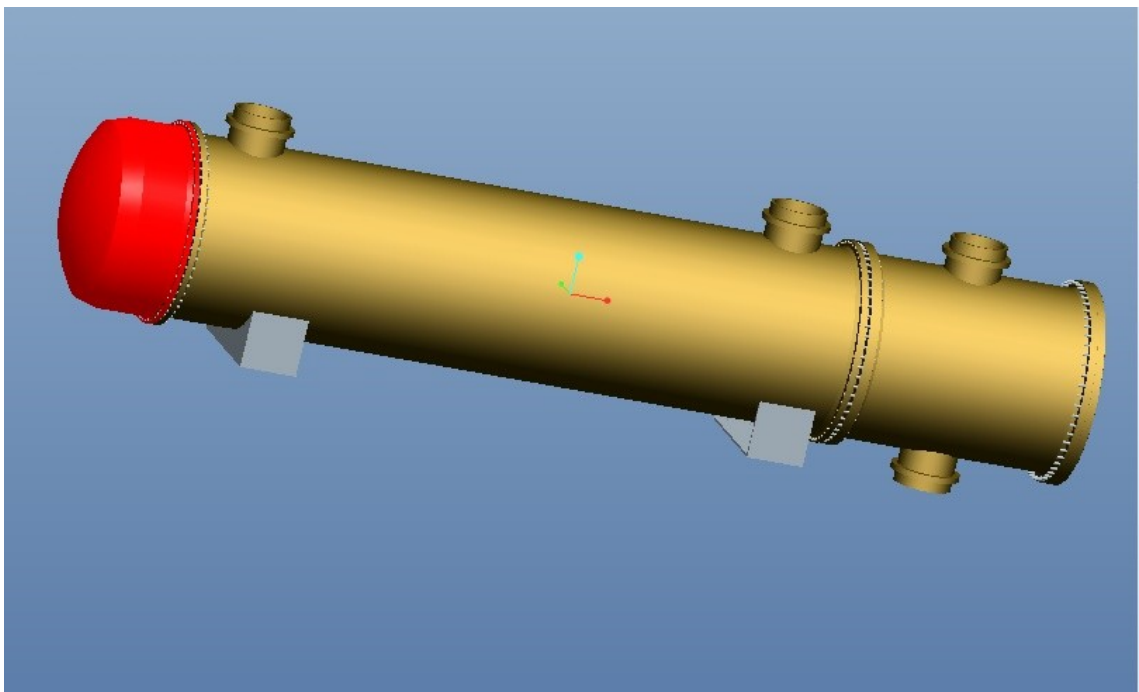
Trubkový svazek



Havarijní výměník s demontovaným víkem



Smontovaný havarijní výměník



## **11. Seznam výkresové dokumentace**

|             |                   |        |
|-------------|-------------------|--------|
| Výkres č. 1 | Havarijní výměník | DIP-01 |
| Výkres č. 2 | Kusovník č. 1     | DIP-02 |
| Výkres č. 3 | Kusovník č. 2     | DIP-03 |
| Výkres č. 4 | Kusovník č. 3     | DIP-04 |